



**TUGAS AKHIR – SF 141501**

**Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik *Cooler*  
Menggunakan Material Semikonduktor *Bismuth  
Telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dan *Software* ANSYS**

**Nilna Fauzia  
NRP 01111440000097**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT  
Diky Anggoro, M.Si**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS ILMU ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**





**TUGAS AKHIR – SF 141501**

**Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik *Cooler*  
Menggunakan Material Semikonduktor *Bismuth  
Telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dan *Software* ANSYS**

**Nilna Fauzia  
NRP 01111440000097**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT  
Diky Anggoro, M.Si**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS ILMU ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**



**FINAL PROJECT – SF 141501**

**Fabrication and Simulation of Thermoelectric  
Cooler Using Bismuth Telluride( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )  
Semiconductor Material and ANSYS Software**

**Nilna Fauzia  
NRP 01111440000097**

**Supervisor :  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT  
Diky Anggoro, M.Si**

**DEPARTEMENT PHYSICS  
FACULTY OF NATURAL SCIENCE  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2018**

## LEMBAR PENGESAHAN

### FABRIKASI DAN SIMULASI TERMoeLEKTRIK COOLER MENGGUNAKAN MATERIAL SEMIKONDUKTOR *BISMUTH TELLURIDE* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) DAN *SOFTWARE* ANSYS

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains  
pada  
Bidang Studi Instrumentasi  
Program Studi S-1 Departemen Fisika  
Fakultas Ilmu Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**NILNA FAUZIA**

**NRP. 01111440000097**

**Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :**

**Dr. Melania Suweni Muntini, M.T**

NIP. 19641229 199002.2.001

**Diky Anggoro, M.Si**

NIP. 19850809 201404.1.003



(.....)

(.....)

# **FABRIKASI DAN SIMULASI TERMOELEKTRIK COOLER MENGUNAKAN MATERIAL SEMIKONDUKTOR BISMUTH TELLURIDE( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) DAN SOFTWARE ANSYS**

**Nama Mahasiswa** : Nilna Fauzia  
**NRP** : 01111440000097  
**Departemen** : Fisika FIA-ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Dr. Melania Suweni Muntini. MT  
2. Diky Anggoro, M.Si

## **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan fabrikasi dan simulasi modul termoelektrik *cooler* dengan material semikonduktor *Bismuth Telluride*( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah semakin tinggi nilai arus yang diberikan, maka perbedaan temperatur yang dihasilkan oleh modul akan semakin tinggi dan penyusunan semikonduktor secara seri mampu menghasilkan perbedaan temperatur tertinggi. Koefisien performansi (COP) modul termoelektrik *cooler* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain, arus yang diberikan, resistansi listrik, koefisien *seebeck*, dan konduktansi termal modul. Nilai temperatur terendah berturut-turut dihasilkan oleh modul tiga pada arus lima Ampere, modul dua pada arus 4,5 Ampere, dan modul satu pada arus empat Ampere. Nilai koefisien performansi modul satu pada arus empat Ampere adalah  $0,12881 \pm 0,000005$ ; pada modul dua saat dialiri arus 4,5 ampere adalah  $0,63361 \pm 0,000005$ ; dan pada modul tiga saat dialiri arus lima ampere adalah  $0,92906 \pm 0,000005$ . Nilai error hasil pengukuran dan simulasi berturut-turut pada modul satu, modul dua, dan modul tiga adalah 7,041%; 5,577%; dan 10,387%.

**Kata Kunci** : arus , koefisien performansi, konduktansi, koefisien *seebeck*, resistansi, *termoelectric cooler*

# ***FABRICATION AND SIMULATION OF THERMOELECTRIC COOLER USING BISMUTH TELLURIDE( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) SEMICONDUCTOR MATERIAL AND ANSYS SOFTWARE***

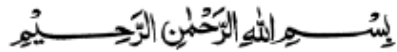
**Name** : Nilna Fauzia  
**NRP** : 01111440000097  
**Department** : Physics, FIA-ITS  
**Supervisors** : 1. Dr. Melania Suweni Muntini. MT  
2. Diky Anggoro, M.Si

## **Abstract**

*This research aims to perform fabrication and simulation of cooler thermoelectric module with Bismuth Telluride( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) semiconductor material. The results obtained from this research is the higher the value of the given current, then the temperature difference generated by the module will be higher and the preparation of semiconductors in series can produce the highest temperature difference. The coefficient of performance (COP) of the cooler thermoelectric module is influenced by several factors, among others, given current, electrical resistance, seebeck coefficient, and thermal conductance of the module. The lowest consecutive temperature values are generated by module three on the Ampere current five, the module of the two Ampere current pads, and the module one on the Ampere four current. The coefficients of the performance of module one on the four Ampere currents are  $0.12881 \pm 0.000005$ ; in the second module when the current flow of 4.5 amperes is  $0.63361 \pm 0.000005$ ; and in the three modules when the current flow of five amperes is  $0.92906 \pm 0.000005$ . The error values of the measurement and simulation results respectively in module one, module two, and module three are 7.041%; 5.577%; and 10.387%.*

**Keywords:** *coefficient of performance, conductance, current, resistance, seebeck coefficient, thermoelectric cooler*

## KATA PENGANTAR



Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat-Nya , petunjukNya atas nikmat iman, islam, dan ikhsan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik Cooler Menggunakan Material Semikonduktor *Bismuth Telluride*(Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) dan Software ANSYS**” dengan optimal dan waktu yang tepat. Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas bantuan, dorongan, dan juga bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik. Sehubungan dengan hal tersebut, maka penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Dr. Melania Suweni Muntini. MT dan Diky Anggoro, M.Si selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membagi pengalaman serta memberikan pengarahan selama proses penelitian dan penyusunan laporan.
2. Assoc. Prof. Dr. Tosawat Seetawan, Dr. Kunchit Singsoog, Miss. Wanatchaporn Namhongsa, dan Mr. Supasit Paengsong yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian di Laboratorium *Thermoelectric Research Center* Sakon Nakhon Rajabhat University Thailand.
3. Iim Fatimah, M.Si dan Drs. Bachtera Indarto, M.Si selaku dosen di Bidang Instrumentasi yang selalu memberikan dukungan dan motivasinya kepada mahasiswa di lingkungan Laboratorium Elektronika.
4. Bapak dan Ibu tercinta yang telah memberikan semua hal terbaik bagi penulis sejak kecil hingga sampai saat ini.



5. Teman seperjuangan Tugas Akhir Alfu dan Rico yang telah membantu dan berdiskusi dengan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Penghuni Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi khususnya, Dila, Mursyid, Ucup, Fauzi, Agung K, Ghinan, Mas Bkti, Mbak Ulfa, Mbak Ira yang telah membantu dan memberikan semangat dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Teman seperjuangan dalam menyelesaikan tugas akhir pada semester ini yaitu Kana, Firda, Ani, Kiki, Niken, Aini dan pendamping wisuda 118 lainnya yang telah memberikan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir
8. Teman-teman ANTARES dan warga fisika lainnya yang telah memberikan dukungan do'a dan semangat kepada penulis
9. Dan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari akan adanya kekurangan dalam penulisan laporan ini karena keterbatasan wawasan dan pengetahuan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak agar lebih baik di masa yang akan datang. Semoga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat berguna dan dimanfaatkan dengan baik sebagai referensi bagi yang membutuhkan serta menjadi sarana pengembangan kemampuan ilmiah bagi semua pihak yang bergerak dalam bidang Fisika Instrumentasi dan Elektronika. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, April 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

COVER .....	i
HALAMAN JUDUL .....	i
TITLE PAGE .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB II .....	7
TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1 Semikonduktor Ekstrinsik .....	7
a) Semikonduktor Tipe-n .....	7
b) Semikonduktor Tipe-p .....	8

2.2 Modul Termoelektrik.....	8
2.3 Efek <i>Seebeck</i> .....	10
2.4 Efek Peltier .....	11
2.3 Material <i>Bismuth Telluride</i> ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ).....	13
BAB III.....	19
METODOLOGI .....	19
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2 Peralatan dan Bahan .....	20
3.3 Langkah Kerja .....	23
3.3.1 Fabrikasi Modul TEC .....	23
3.3.2 Pengukuran Modul TEC.....	26
3.3.3 Simulasi dengan ANSYS 12 .....	26
BAB IV.....	29
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	29
4.1 Hasil Pengukuran Perbedaan Temperatur Modul Termoelektrik <i>Cooler</i> .....	29
4.2 Perhitungan Resistansi Listrik, Konduktansi Termal, dan Koefisien <i>Seebeck</i> tiap Modul .....	32
4.3 Perhitungan Tegangan Kerja, Daya yang Dibutuhkan, dan Koefisien Performansi Modul .....	38
BAB V .....	49
KESIMPULAN DAN SARAN .....	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran .....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN .....	53
BIODATA PENULIS.....	68

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pita Energi Semikonduktor tipe-n.....	7
Gambar 2.2. Pita Energi Semikonduktor tipe-p .....	8
Gambar 2.3. Modul Termoelektrik.....	9
Gambar 2.4. Efek <i>Seebeck</i> .....	11
Gambar 2.5. Efek Peltier .....	12
Gambar 2.6. Material Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> .....	13
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian 19	
Gambar 3.2. Peralatan dan Bahan Fabrikasi.....	20
Gambar 3.3. Skema Rangkaian Pengukuran Modul.....	22
Gambar 3.4. Desain Modul 1 TEC .....	23
Gambar 3.5: Desain Modul 2 TEC.....	24
Gambar 3.6. Desain Modul 3 TEC .....	24
Gambar 3.7. Diagram Alir Fabrikasi Modul TEC.....	25
Gambar 4.1. Temperatur Sisi Panas dan Dingin pada Modul saat Pengukuran 30	
Gambar 4.2. Perbedaan Temperatur yang Dihasilkan Modul saat Pengukuran .....	30
Gambar 4.3. Pengaruh Arus terhadap Tegangan pada Modul.....	39
Gambar 4.4. Pengaruh Arus terhadap Daya yang Masuk pada Modul .....	40
Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Arus terhadap Koefisien Performansi Modul.....	42
Gambar 4.6. Variabel <i>Input</i> pada Proses Simulasi .....	45
Gambar 4.7. Perbandingan Beda Temperatur Hasil Simulasi dan Pengukuran .....	45

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1. Sifat-sifat Material penyusun Termoelektrik.....	33
Tabel 4.2. Dimensi Material pada Modul Satu.....	33
Tabel 4.3. Dimensi Material pada Modul Dua .....	34
Tabel 4.4. Dimensi Material pada Modul Tiga .....	36
Tabel 4.5. Linearitas masing-masing data Hasil Simulasi dan Pengukuran. ....	46
Tabel 4.6. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Satu.....	47
Tabel 4.7. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Dua .....	47
Tabel 4.8. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Tiga ....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Fabrikasi Modul Termoelektrik <i>Cooler</i> .....	53
Lampiran 2. Hasil Perhitungan Tegangan yang bekerja pada modul.....	54
Lampiran 3. Hasil Perhitungan Daya yang Bekerja pada Modul	54
Lampiran 4. Hasil Perhitungan Koefisien Performansi Modul ...	55
Lampiran 5. Hasil Simulasi Modul Termoelektrik Cooler.....	55

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Temperatur rata-rata permukaan bumi meningkat setiap tahun sebesar 1,1 derajat celcius (Febrianti, 2009). Temperatur permukaan bumi yang meningkat menyebabkan kebutuhan terhadap alat pendingin ruangan bertambah. Pada umumnya, peralatan pendingin memerlukan cairan pendingin (*refrigerant*) untuk beroperasi dan yang kerap digunakan adalah *freon*. Penggunaan freon memiliki dampak negatif karena dapat merusak ozon atau disebut sebagai *Ozon Depleting Substance* (ODS). Jenis pendingin lain adalah hidrokarbon yang bersifat mudah terbakar.

Melihat permasalahan di atas, untuk menghasilkan temperatur dingin perlu adanya jenis pendingin lain yang dapat menggantikan *refrigerant* salah satunya adalah termoelektrik. Termoelektrik akan menghasilkan perbedaan temperatur ketika dialiri arus listrik atau sebaliknya (Gokhale *et al.*, 2017). Untuk menghasilkan temperatur dingin, termoelektrik tidak mengeluarkan zat sisa yang dapat mencemari lingkungan (Cai *et al.*, 2016). Dengan kemampuan tersebut, termoelektrik berpotensi untuk dikembangkan sebagai teknologi pendingin.

Ukuran kemampuan suatu teknologi pendingin dinyatakan dengan besaran tak berdimensi yang disebut koefisien performansi (COP). Modul termoelektrik terutama sebagai pendingin saat ini memiliki COP rendah. Penelitian untuk meningkatkan COP modul telah dilakukan sebelumnya oleh Ming Ma dkk. Dalam penelitiannya, Ming Ma dkk menyatakan bahwa termoelektrik dengan susunan *cascade* dua *stages* memiliki

COP optimum sebesar 0.05 ketika dialiri arus listrik 25 Ampere. Dalam penelitian tersebut, material sisi panas dan material sisi dingin didesain memiliki luas penampang yang sama. Namun, panjang kaki pada material sisi panas lebih rendah dari kaki material sisi dingin. Hal ini karena kapasitas pemompaan kalor berbanding terbalik dengan panjang kaki material. Semakin rendah panjang kaki material sisi panas, maka aliran kalor akan semakin rendah dari sisi panas menuju material sisi dingin (Ma and Yu, 2014). M.S Muntini (2017) melakukan penelitian pada modul termoelektrik generator oksida. Tegangan listrik yang dihasilkan dan daya keluaran maksimum pada penelitian ini adalah 0,23V dan 56,2mW. Efisiensi modul termoelektrik dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain *heat loss*, arus yang dihasilkan, jarak antara lengan material termoelektrik dan elektroda. Dalam penelitian ini, diperoleh hasil yang linear antara simulasi dan pengukuran.

*Software* yang dimanfaatkan dalam mendukung pengembangan termoelektrik adalah *SolidWorks* dan ANSYS. *SolidWorks* digunakan untuk merancang sistem modul secara utuh dalam bentuk tiga dimensi (Sigit, 2009). *Software* ANSYS digunakan untuk mengetahui beda temperatur yang dihasilkan modul ketika dialiri arus listrik (Pooja, 2016). Material-material semikonduktor sebagai bahan penyusun modul termoelektrik memiliki berbagai sifat fisis dan dimensi yang berbeda-beda. Nilai koefisien performansi sebuah modul ditentukan oleh sifat fisis material antara lain resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *seebeck* modul. Selain itu, dimensi material dan konfigurasi penyusunan modul juga berpengaruh terhadap koefisien performansi modul. (Mitrani *et al.*, 2009). Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan fabrikasi modul termoelektrik dengan konfigurasi susunan padatan semikonduktor tipe-p dan



tipe-n yang berbeda-beda. Setelah dilakukan fabrikasi, dilakukan pengukuran terhadap masing-masing modul untuk mengetahui beda temperatur yang dapat dihasilkan oleh modul. Selanjutnya, dilakukan perhitungan untuk mengetahui koefisien performansi dari masing-masing modul. Dilakukan simulasi dengan *software* ANSYS 12 untuk mengetahui perbedaan temperatur yang dihasilkan dalam simulasi, sehingga *output* hasil simulasi dapat dibandingkan dengan hasil pengukuran.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- a) Berapa nilai temperatur terendah dan pada arus *input* berapa nilai temperatur terendah dihasilkan masing-masing modul termoelektrik *cooler*?
- b) Berapa nilai perhitungan koefisien performansi pada temperatur terendah masing-masing modul termoelektrik *cooler*?
- c) Berapakah nilai error antara hasil pengukuran dan simulasi modul termoelektrik *cooler*?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

- a) Untuk mengetahui pengaruh arus input terhadap perbedaan temperatur yang dihasilkan modul.
- b) Untuk mengetahui pengaruh penyusunan semikonduktor tipe-p dan tipe-n terhadap koefisien performansi modul.
- c) Untuk mengetahui nilai error hasil pengukuran dan simulasi modul termoelektrik *cooler*.

#### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, dibatasi beberapa batasannya adalah sebagai berikut:

- a) *Software* yang digunakan untuk mendesain modul 3D dan simulasi berturut-turut adalah *software* SolidWorks dan ANSYS 12.
- b) Material Semikonduktor yang digunakan untuk fabrikasi adalah *Bismuth Telluride*( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ).
- c) Menggunakan Substrat Alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan konduktor *Copper*(Cu).
- d) Fabrikasi terhadap 3 Modul TEC dengan konfigurasi struktur material tipe-p dan tipe-n berbeda.
- e) Pengukuran Modul dilakukan dengan *software* TRC-PEN3 *MultiDevice Link*.
- f) Pengambilan data saat pengukuran dilakukan secara *realtime* selama 400 sekon.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah dihasilkan modul TEC dengan koefisien performansi yang lebih baik dan dapat diaplikasikan sebagai pendingin ramah lingkungan.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Bab I – Pendahuluan, berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan laporan penelitian.
2. Bab II – Tinjauan Pustaka, berisi uraian mengenai teori yang mendukung analisis.

3. Bab III – Metodologi Penelitian, berisi alat dan bahan, data penelitian, serta uraian mengenai metode-metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian.
4. Bab IV – Analisis Data dan Pembahasan, menjelaskan tentang hasil-hasil yang didapat dari pengerjaan pada penelitian ini.
5. Bab V – Kesimpulan dan Saran, berisi uraian mengenai kesimpulan dari hasil analisis data dan pembahasan serta saran-saran yang digunakan untuk mendukung penelitian selanjutnya.
6. Lampiran, berisi data – data yang digunakan dalam penelitian beserta beberapa gambar yang menunjang penelitian ini.

*“Halaman Ini Sengaja di Kosongkan”*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Semikonduktor Ekstrinsik

##### a) Semikonduktor Tipe-n

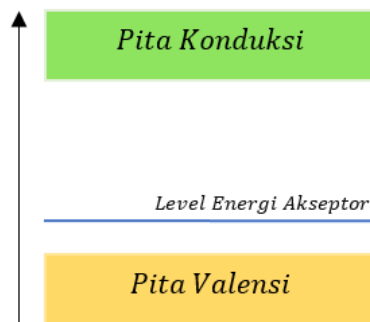
Semikonduktor tipe-n merupakan suatu bahan semikonduktor intrinsik yang didoping dengan material yang memiliki kelebihan elektron valensi. Misalkan atom Silikon bervalensi empat didoping dengan atom Arsen (atom donor) bervalensi lima. Atom yang telah didoping memiliki kelebihan satu elektron. Pada pita energi seperti Gambar 2.1, elektron kelima atom donor mengisi level energi donor. Ketika terjadi ionisasi, elektron atom donor akan berpindah dari level energi donor menuju pita konduksi dan elektron dari pita valensi juga berpindah menuju pita konduksi. Akibat perpindahan elektron tersebut, pada pita valensi terbentuk lubang. Namun, jumlah elektron pada pita konduksi lebih banyak dari lubang pada pita valensi. Oleh karena itu, membawa muatan mayoritas semikonduktor tipe-n adalah elektron dan pembawa muatan minoritasnya adalah lubang. (William, 2010).



Gambar 2.1. Pita Energi Semokondutor tipe-n

### b) Semikonduktor Tipe-p

Semikonduktor Tipe-p merupakan semikonduktor intrinsik yang didoping dengan atom bervalensi tiga. Misalkan atom Silikon(Si) bervalensi empat didoping dengan atom Boron(B) bervalensi tiga. Ketika terjadi ionisasi, elektron atom bervalensi empat yang terdapat pada pita valensi akan berpindah menuju atom bervalensi tiga. Oleh karena itu, atom bervalensi tiga disebut sebagai atom akseptor. Level energi *hole* akseptor jaraknya sangat dekat dengan pita valensi seperti Gambar 2.2, sehingga hanya dibutuhkan energi yang sangat kecil untuk memindahkan elektron dari pita valensi menuju *hole* akseptor. Selain itu, elektron atom bervalensi empat dari pita valensi juga berpindah menuju pita konduksi. Sehingga jumlah elektron pada pita konduksi tidak sebanyak *hole* pada pita valensi. Oleh karena itu, pembawa muatan mayoritas pada semikonduktor tipe-p adalah lubang, sedangkan pembawa muatan minoritasnya adalah elektron. (William, 2010).



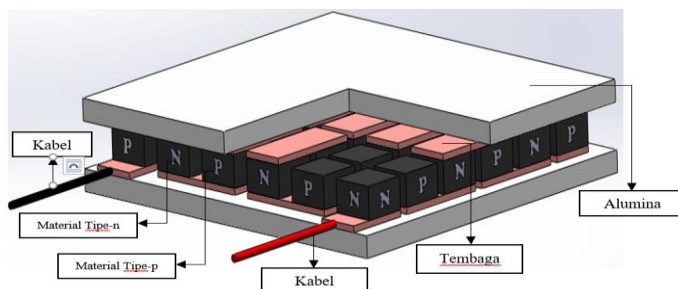
Gambar 2.2. Pita Energi Semikonduktor tipe-p

## 2.2 Modul Termoelektrik

Modul termoelektrik merupakan suatu piranti yang dapat mengkonversi perbedaan temperatur menjadi energi listrik atau mengonversi energi listrik menjadi energi kalor. Modul

termoelektrik terbuat dari material semikonduktor dan pada umumnya berbentuk dua persegi yang sejajar. Modul termoelektrik tersusun dari beberapa pasang semikonduktor yang salah satu sisinya terhubung oleh suatu konduktor satu sama lain seperti Gambar 2.3.  $T_h$  dan  $T_c$  adalah temperatur pada sisi panas modul dan temperatur di sisi dingin modul. Pada bagian sisi atas dan bawah ditutup oleh isolator yang berfungsi sebagai tempat terjadinya temperatur panas dan dingin (Muhaimin, 1993).

Modul termoelektrik dibagi menjadi dua jenis berdasarkan prinsip kerjanya. Termoelektrik *generator* bekerja ketika kedua sisi modul terjadi perbedaan temperatur maka akan menghasilkan tegangan listrik diantara ujung-ujungnya. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi salah satunya oleh perbedaan temperatur yang terjadi pada sisi panas dan sisi dingin. Termoelektrik *cooler* bekerja ketika modul termoelektrik dialiri arus listrik pada ujung-ujung semikonduktor, maka akan terjadi perbedaan temperatur pada kedua sisi modul. Energi panas yang dihasilkan dan diserap dipengaruhi oleh input daya listrik pada termoelektrik. Termoelektrik *generator* bekerja berdasarkan efek *seebeck* dan termoelektrik *cooler* bekerja berdasarkan efek *peltier* (Dimri *et al.*, 2018).



Gambar 2.3. Modul Termoelektrik

Tantangan terbesar yang dihadapi dalam pengembangan termoelektrik adalah koefisien performansinya yang rendah. Perbedaan temperatur yang dihasilkan modul termoelektrik dipengaruhi oleh arus listrik yang dialirkan pada modul. Arus listrik yang dialirkan melewati komponen-komponen modul termoelektrik. Modul termoelektrik harus memiliki konduktivitas listrik( $\sigma$ ) yang tinggi dan konduktivitas termal( $\kappa$ ) yang rendah, agar perbedaan temperatur tetap terjaga. Besaran-besaran yang menentukan kualitas suatu modul termoelektrik dirumuskan menjadi suatu besaran tak berdimensi yang disebut *figure of merit*( $ZT$ ). *Figure of merit* secara matematis dapat dirumuskan seperti persamaan (2.1).

$$ZT = \left( \frac{\sigma S^2}{\kappa} \right) T \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik,  $\kappa$  adalah konduktivitas termal,  $S$  adalah koefisien *seebeck*, dan  $T$  merupakan temperatur. Dalam pengaplikasiannya, modul termoelektrik banyak digunakan dari bahan semikonduktor p-n *junction*(Fergus, 2012).

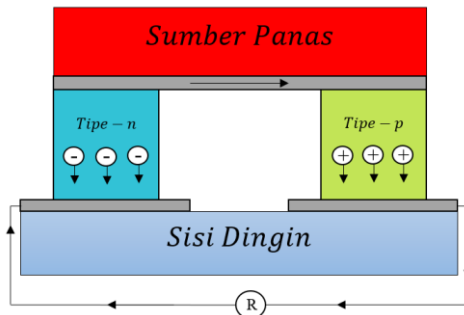
### 2.3 Efek Seebeck

Efek *seebeck* merupakan suatu efek adanya perbedaan temperatur pada suatu material, yang menyebabkan pembawa muatan mengalir dari sumber panas menuju sisi dingin seperti ilustrasi pada Gambar 2.4. Aliran pembawa muatan ini akan memunculkan beda potensial diantara kedua ujungnya yang sebanding dengan perbedaan temperatur yang diberikan. Perbandingan antara perbedaan temperatur dengan beda potensial merupakan sifat intrinsik material yang disebut dengan koefisien *seebeck* atau *thermopower*.



$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{\text{hot}} - V_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Koefisien *seebeck* bernilai negatif karena elektron sebagai pembawa muatan bergerak dari sumber panas menuju sisi dingin, sehingga menyebabkan beda potensial negatif.  $\alpha$  adalah koefisien *seebeck* dan  $\Delta T$  merupakan perbedaan temperatur diantara dua sisi material termoelektrik. Koefisien *seebeck* memiliki satuan V/K. Akibat adanya perbedaan temperatur diantara dua sisi, menyebabkan pembawa muatan (elektron pada tipe-n dan *hole* pada tipe-p) menjauhi sisi panas sehingga menyebabkan ketidakseimbangan muatan antara sisi panas dan sisi dingin. Setiap bahan memiliki koefisien *seebeck* yang berbeda-beda berdasarkan sifat listrik suatu bahan. Semakin besar koefisien *seebeck* suatu bahan, maka beda potensial yang dihasilkan juga akan semakin besar. (Pooja, 2016) (Ngendahayo, 2017).



Gambar 2.4. Efek *Seebeck*

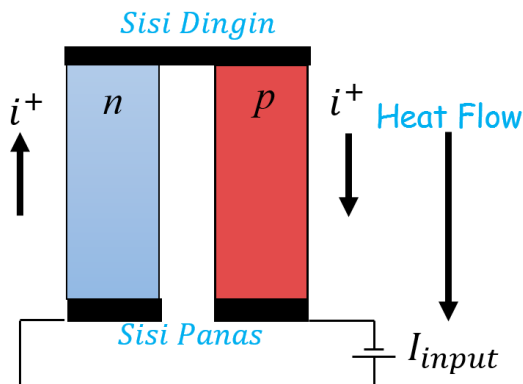
## 2.4 Efek *Peltier*

Efek *peltier* adalah kebalikan dari efek *seebeck*. Efek *peltier* merupakan suatu fenomena ketika arus dilewatkan pada material termoelektrik akan terjadi perbedaan temperatur pada ujung-ujungnya seperti pada Gambar 2.5. Ketika arus memasuki

material tipe-n, maka elektron akan bergerak menuju arah datangnya arus, dan arus akan melewati material menuju konduktor logam dan bergerak dari atas sisi tipe-p menuju ke bawah membawa sejumlah energi. Aliran pembawa muatan ini membawa energi berupa kalor sehingga akan terjadi perbedaan temperatur diantara dua sisi. Total kalor yang dikeluarkan dan ditambahkan sebanding dengan arus yang mengalir. Hal ini disebut dengan efek *peltier* dan dapat didefinisikan dengan persamaan (2.3)

$$\dot{Q}_p = \pi I = \alpha T_j I \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan  $\pi$  adalah koefisien *peltier*,  $\dot{Q}_p$  adalah keseluruhan kalor yang ditambah atau dikeluarkan oleh sistem dalam satu satuan waktu, dan  $I$  adalah arus listrik yang melewati elemen termoelektrik.  $\alpha$  adalah koefisien *peltier* dan  $T_j$  adalah temperatur yang dihasilkan. Meskipun pendingin *peltier* tidak se-efisien pendingin yang lainnya, pendingin *peltier* lebih akurat dan mudah untuk di kontrol. (Pooja, 2016).



Gambar 2.5. Efek Peltier

### 2.3 Material *Bismuth Telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )

Secara umum, material termoelektrik dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan temperatur kerjanya, yaitu material temperatur rendah (200K-500K), material temperatur sedang (500K-800K), dan material temperatur tinggi (>800K). Material temperatur rendah termoelektrik merupakan paduan logam *Bismuth Telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dan  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Paduan logam  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dan  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  merupakan material termoelektrik dengan *Figure of Merit* tertinggi yang bekerja pada temperatur 200-400 K. Material tersebut memiliki *Figure of Merit* (ZT) relatif satu dan merupakan material terbaik untuk termoelektrik pada temperatur kamar dibanding material padatan yang lain. Peningkatan performansi material dilakukan oleh Poudel et al. pada tahun 2008 ketika diperoleh nilai ZT sebesar 1.4 pada temperatur 373K dengan mengenakan fitur kristal nano dalam paduan logam padatan tipe-p  $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$  (Ngendahayo, 2017). Pada umumnya, material termoelektrik  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  yang digunakan sebagai material utama termoelektrik berbentuk bulk seperti Gambar 2.6



Gambar 2.6. Material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

## 2.4 Daya Listrik

Modul termoelektrik *cooler* memerlukan masukan daya listrik untuk bekerja sehingga dapat menghasilkan perbedaan temperatur pada kedua sisinya. Daya listrik (P) merupakan laju hantaran energi dalam suatu rangkaian listrik. Bila arus listrik (I) mengalir dalam selang waktu  $dt$ , maka muatan listriknya( $dQ$ ) dapat ditulis menurut persamaan (2.4)

$$dQ = Idt.....(2.4)$$

Energi listrik yang dihasilkan merupakan perkalian antara muatan yang ada dengan beda potensial listrik dan dapat ditulis seperti persamaan (2.5).

$$E = dQ \times V = V \times I \times dt.....(2.5)$$

Untuk menghitung energi listrik yang mengalir tiap satu satuan waktu(detik), maka persamaan (2.5) dibagi dengan  $dt$ . Inilah yang disebut dengan daya listrik seperti persamaan (2.6).

$$P = V \times I.....(2.6)$$

Beda potensial listrik (V) berbanding lurus dengan arus yang mengalir( $V \sim I$ ). Perbandingan beda potensial dengan arus yang mengalir merupakan suatu bilangan konstan yang disebut sebagai resistansi(R). Maka, hubungan beda potensial, arus yang mengalir, dan resistansi dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut

$$V = I \times R.....(2.7)$$

Persamaan (2.7) dikenal sebagai Hukum Ohm. Nilai R akan selalu konstan berapapun beda potensial yang diberikan. Satuan resistansi adalah Ohm atau disimbolkan dengan “Omega” ( $\Omega$ ). Dengan mensubtitusikan persamaan (2.7) ke persamaan (2.6), maka kita peroleh persamaan

$$P = I^2 \times R.....(2.8)$$

Persamaan (2.8) menunjukkan bahwa daya listrik pada suatu rangkaian berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir pada rangkaian (Giancoli, 2005).

## 2.5 Koefisien Performansi Modul Termoelektrik Cooler

Kualitas dari suatu modul termoelektrik *cooler* dilihat dari nilai koefisien performansinya. Koefisien performansi(COP) merupakan perbandingan dari kalor yang diserap oleh sisi dingin tiap detik dan selisih kalor yang dikeluarkan sisi panas dan diserap sisi dingin tiap detik. Koefisien performansi suatu termoelektrik *cooler* dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2.9).

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h - \dot{Q}_c} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana  $\dot{Q}_h$  merupakan kalor yang dikuarkan pada sisi panas per satuan waktu dan  $\dot{Q}_c$  merupakan kalor yang diserap oleh sisi dingin per satuan waktu. Nilai kalor yang dibuang pada sisi panas dan diserap oleh dingin dapat dihitung berdasarkan persamaan (2.10) dan (2.11).

$$\dot{Q}_h = \alpha I T_h - K(T_h - T_c) + \frac{1}{2} R I^2 \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\dot{Q}_c = \alpha I T_c - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} R I^2 \dots \dots \dots (2.11)$$

Suku pertama persamaan (2.10) dan (2.11) merupakan efek *peltier* dan merupakan proses reveribel. Semakin besar efek *peltier*-nya semakin besar pendinginannya. Bentuk kedua merupakan konduktansi termal dan termasuk proses *irreversible*. Bentuk ketiga adalah pemanasan Joule dan termasuk proses irreversibel. Untuk menentukan konduktansi termal dimana secara fisis terjadi secara parallel dan resistansi listrik yang tersusun secara seri serta koefisien *seebeck* modul, digunakan persamaan (2.12); (2.13); dan (2.14).

$$K = N(k_n + k_p) \frac{A}{L} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$R = N(\rho_n + \rho_p) \frac{L}{A} + N_c \frac{\rho_c}{A_c} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\alpha = N(|\alpha_p| + |\alpha_n|) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana  $T_h$  dan  $T_c$  merupakan temperatur pada sisi panas dan dingin,  $K$  adalah konduktansi termal total yang merupakan penjumlahan dari konduktansi termal tipe-p( $k_p$ ) dan tipe-n( $k_n$ ).  $R$  merupakan resistansi listrik modul.  $A$  adalah luas penampang semikonduktor dan  $I$  merupakan arus yang mengalir ke dalam modul.  $\rho$  adalah resistivitas listrik material semikonduktor, merupakan penjumlahan dari resistivitas listrik semikonduktor tipe-p ( $\rho_p$ ) dan tipe-n ( $\rho_n$ ).  $\alpha$  adalah koefisien *seebeck* modul TEC, sedangkan  $\alpha_p$  adalah koefisien *seebeck* tipe-p dan  $\alpha_n$  koefisien *seebeck* tipe-n.  $L$  merupakan panjang kaki material semikonduktor serta  $N$  adalah jumlah pasangan material semikonduktor pada modul (Huang *et al.*, n.d.; Ma and Yu, 2014; Mitrani *et al.*, 2009).

## 2.6 SolidWorks

*SolidWorks* adalah salah satu CAD *software* yang dibuat oleh DASSAULT SYSTEM. *SolidWorks* digunakan untuk merancang part permesinan dan penyusunannya dengan tampilan 3D. *SolidWorks* digunakan untuk mempresentasikan part sebelum *real part* nya dibuat (Sigit, 2009). *SolidWorks* mampu untuk mendesain bagian-bagian part dan menggabungkan part satu dengan part lain menjadi satu kesatuan sistem yang utuh. Termoelektrik terdiri dari berbagai komponen dan masing-masing komponen memiliki dimensi yang berbeda-beda. Oleh karena itu, digunakan *software SolidWorks* untuk membentuk suatu sistem modul termoelektrik yang utuh dalam bentuk visual.

*Software SolidWorks* terdiri dari beberapa bagian, antara lain *part*, *assembly*, dan *drawing*. *Part* adalah sebuah objek tiga dimensi yang terbentuk dari beberapa fitur. Sebuah *part* dapat

menjadi sebuah komponen pada suatu *assembly*, dan dapat digambarkan dalam bentuk dua dimensi pada sebuah *drawing*. *Assembly* adalah sebuah dokumen dimana *part*, *feature*, dan *assembly* lain dipasangkan atau disatukan bersama, *drawing* adalah *templates* yang digunakan untuk membuat gambar dua dimensi dari satu komponen atau *assembly* yang sudah kita buat.

## 2.7 ANSYS

ANSYS adalah sebuah *software* yang digunakan untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan analisis mekanika benda tegar, analisis fluida, dan analisis perpindahan panas. Secara umum penyelesaian menggunakan ANSYS dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu *preprocessing* atau pendefinisian masalah, *solution*, dan *postprocessing*. Langkah umum dalam *Preprocessing* adalah pendefinisian bentuk bahan, dimensi, dan sifat geometri bahan, mendefinisikan tipe elemen dan bahan yang digunakan/sifat geometri, dan mendefinisikan *mesh*, *areas*, dan volume yang dibutuhkan. Jumlah detail yang dibutuhkan tergantung pada dimensi yang dianalisis. Tahap *solution* adalah tahap penyelesaian persamaan yang telah di set. Pada tahap *solution* ditentukan beban (titik atau tekanan), *constraints* (translasi atau rotasi) dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang dimasukkan. Pada tahap *postprocessing* pengguna dapat melihat plot *deflection*, daftar pergeseran nodal, gaya elemen dan momentum, serta diagram kontur tegangan atau pemetaan temperatur. pada aplikasinya, menurut dimensinya ANSYS dapat dibagi menjadi dua, yaitu ANSYS *Classic* dan ANSYS *Workbench*. ANSYS *classic* menyelesaikan masalah dalam dua dimensi seperti *system solid* dalam bidang dua dimensi dan perpindahan panas dalam dua dimensi. ANSYS *Workbench* menyelesaikan masalah dalam tiga dimensi seperti *system solid*

dalam tiga dimensi dan masalah aliran fluida pada pipa dalam tiga dimensi. Pada modul termoelektrik, untuk mengetahui perbedaan temperatur yang dapat dihasilkan oleh modul, digunakan *software* ANSYS (Mani, 2016).

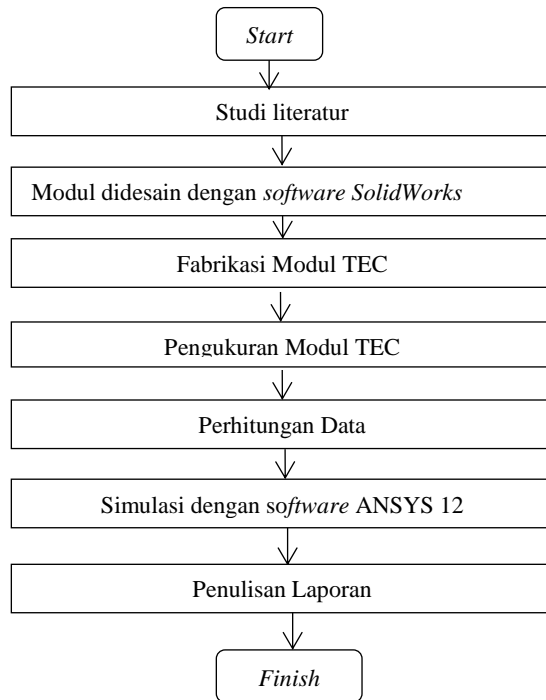


## BAB III

### METODOLOGI

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah. Diagram alir penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa penelitian diawali dengan studi literatur. Studi literatur mengenai termoelektrik dan sistem kerjanya, dan parameter-parameter yang berpengaruh.

### 3.2 Peralatan dan Bahan

Pada penelitian ini alat dan bahan yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

#### 3.2.1) Peralatan dan Bahan Fabrikasi

Peralatan dan bahan yang dibutuhkan pada proses fabrikasi adalah seperti pada Gambar 3.2.

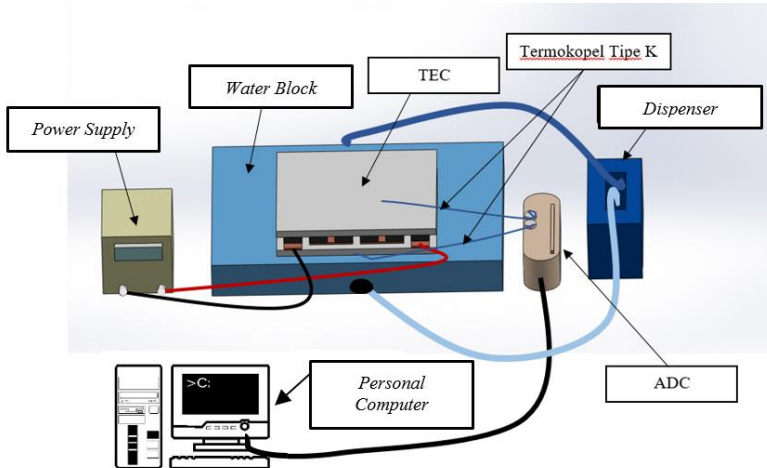


Gambar 3.2. Peralatan dan Bahan Fabrikasi

- a. Gunting  
Gunting digunakan untuk memotong konduktor tembaga menjadi ukuran yang dibutuhkan.
- b. *Solder*  
*Solder* digunakan untuk menempelkan material semikonduktor dengan tembaga.
- c. Multimeter  
Sambungan antar material perlu diperhatikan agar kontak antar material dan tembaga sesuai dengan desain. Setiap material tipe p dan tipe-n masing- masing harus dipastikan sambungannya benar. Digunakan multimeter untuk menguji apakah antar material sudah tersambung atau belum.
- d. Pinset  
Material penyusun termoelektrik harus steril sehingga tidak boleh tersentuh oleh tangan manusia, karena material dapat terkontaminasi dengan zat kimia lain. Selain itu, material penyusun termoelektrik berukuran milimeter. Maka diperlukan pinset untuk memudahkan proses fabrikasi.
- e. Substrat Alumina  
Substrat alumina merupakan bagian sisi panas dan dingin modul. substrat alumina terletak pada bagian modul yang paling luar.
- f. *Copper*  
*Copper* digunakan sebagai penghubung antar semikonduktor.
- g. Material Semikonduktor  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$   
Material Semikonduktor  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  merupakan material utama penyusun modul termoelektrik.
- h. Lem G  
Lem G digunakan untuk menempelkan *copper* (Cu) pada substrat alumina.
- i. Timah  
Timah digunakan sebagai perekat antara material semikonduktor dengan *copper* (Cu).

### 3.2.2) Peralatan Pengukuran

Peralatan yang diperlukan untuk proses pengambilan data dan penyusunannya ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Skema Rangkaian Pengukuran Modul

- a. *Power Supply*  
*Power Supply* digunakan untuk memberi dan mengatur arus input pada modul
- b. Termokopel Tipe K  
Untuk merekam data temperatur pada kedua sisi termoelektrik.
- c. ADC  
Untuk mengkonversi data analog dari termokopel agar dapat direkam oleh komputer secara *realtime*.
- d. *Dispenser* Pendingin  
Untuk mendinginkan air yang berfungsi sebagai media pendingin modul pada sisi panas
- e. *Water Block*

Sebagai tempat aliran air dingin untuk menyerap panas.  
Water block diletakkan di bawah sisi panas modul.

- f. *Software TRC-PEN3 MultiDevice Link.*

Sebagai *software* perekaman data temperatur panas dan dingin pada *personal computer*.

- g. *Personal Computer*

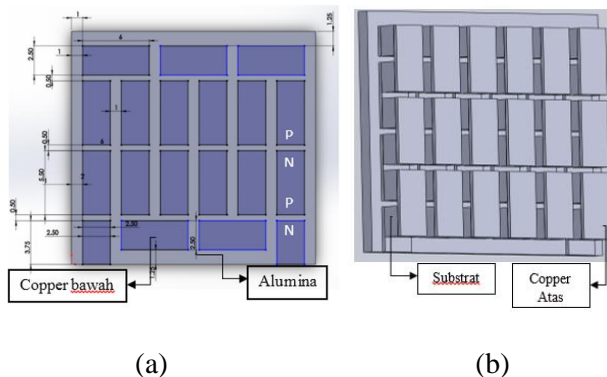
Untuk menampilkan dan menyimpan data hasil perekaman

### 3.3 Langkah Kerja

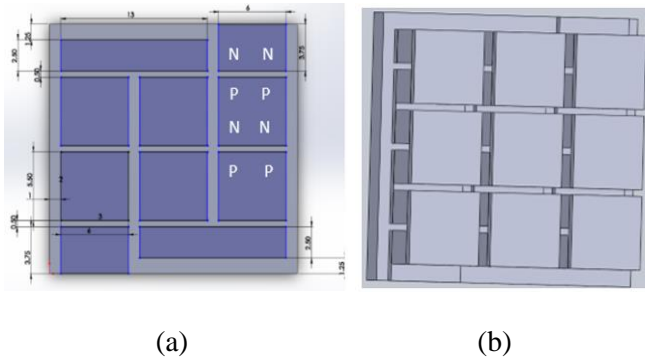
Langkah kerja pada penelitian ini terdiri dari tiga urutan, yaitu fabrikasi modul TEC, pengukuran modul TEC, dan simulasi.

#### 3.3.1 Fabrikasi Modul TEC

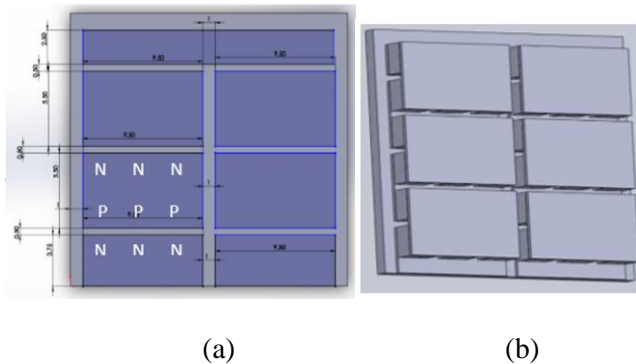
Sebelum dimulai fabrikasi, modul TEC disketsa terlebih dahulu dengan *Software SolidWorks* dalam bentuk 3 dimensi. Gambar 3.4; Gambar 3.5; dan Gambar 3.6 adalah sketsa modul satu, modul dua, dan modul tiga TEC yang mana ketiganya memiliki susunan tipe-p dan tipe-n yang berbeda.



Gambar 3.4. Desain Modul 1 TEC  
(a) Tampak Bawah (b) Tampak Atas



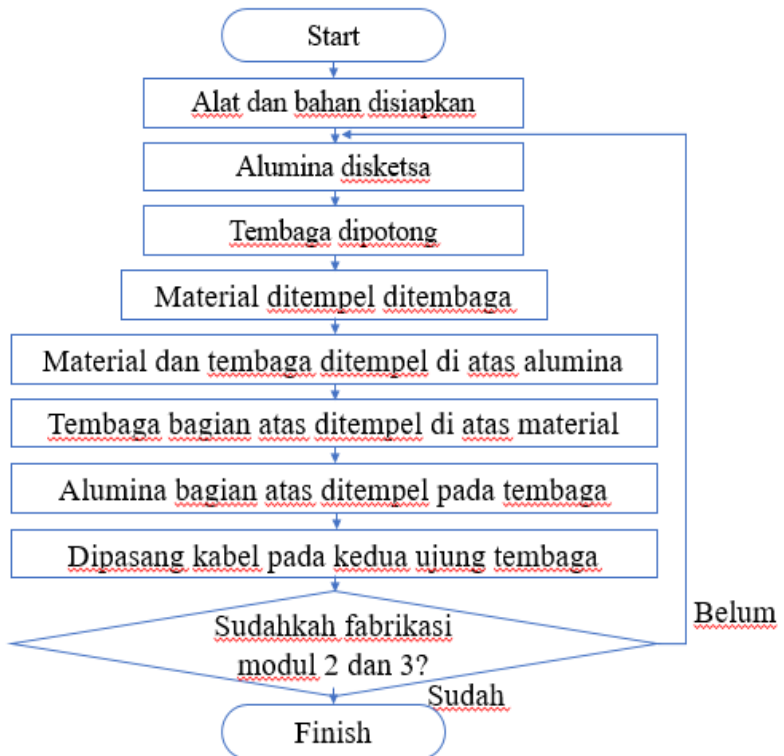
(b) Tampak Bawah (b) Tampak Atas



Gambar 3.6. Desain Modul 3 TEC  
(c) Tampak Bawah (b) Tampak Atas

Setelah sketsa selesai dilakukan, tahapan selanjutnya yaitu fabrikasi modul dengan metode *soldering*. Dimensi alumina yang digunakan fabrikasi yaitu 22x20x1 mm. Tembaga yang digunakan adalah 6x2,5x0,3 mm, sedangkan elemen semikonduktor berukuran 2,5x2,5x1,5 mm. Fabrikasi dilakukan dengan mensketsa alumina dengan pensil. Kemudian tembaga yang telah dipotong

ditempel di atas alumina dengan lem. Selanjutnya material tipe-p dan tipe-n diletakkan diatas tembaga sesuai dengan desain menggunakan solder. Setelah dilakukan peletakan material di atas tembaga, maka harus dipastikan bahwa sambungan yang dilakukan sudah sesuai dengan desain. Langkah selanjutnya adalah tembaga diletakkan di atas material dan diatas tembaga diletakkan alumina pada sisi atas. Pada tiap-tiap ujung modul disambungkan dengan kabel. Lalu diukur resistansi modul, jika resistansi nya dalam satuan Ohm, sambungan antar komponen di dalam modul sesuai. Gambar 3.7 berikut *flowchart* merupakan proses fabrikasi modul.



Gambar 3.7. Diagram Alir Fabrikasi Modul TEC

### 3.3.2 Pengukuran Modul TEC

Sebelum dilakukan pengukuran modul, pertama-tama modul dialiri arus listrik untuk mengetahui *coldside* dan *hotside* pada modul. Setelah diketahui sisi dingin dan panasnya, kemudian peralatan dirangkai seperti Gambar 3.1. Modul TEC dihubungkan dengan *power supply*. Pada sisi panas modul ditempel *water block* sebagai *cooler* untuk membuang panas yang dihasilkan oleh modul. Lalu pada kedua sisi modul ditempel termokopel tipe-k untuk merekam temperatur secara simultan. Kemudian ujung termokopel tipe-k yang lain dihubungkan dengan ADC *converter* untuk mengubah sinyal analog menuju digital. ADC *converter* dihubungkan dengan *personal computer*, data hasil rekaman temperatur oleh termokopel tipe-k ditampilkan di *personal computer* sehingga dapat diketahui perbedaan temperatur antara dua sisi.

Proses perekaman temperatur dimulai dari pemberian arus 0,5 Ampere selama 400 detik. Perekaman temperatur dilakukan dalam jangka waktu tersebut untuk memperoleh temperatur stabil setelah terjadi kenaikan temperatur akibat penambahan arus. Setelah dilakukan perekaman temperatur dalam jangka waktu tertentu, kemudian file di simpan dalam excel. Kemudian arus dinaikkan hingga satu Ampere dan dilakukan perekaman temperatur selama 500 detik. Dilakukan cara yang sama untuk temperatur 1,5 Ampere hingga lima Ampere pada modul satu, modul dua, dan modul tiga.

### 3.3.3 Simulasi dengan ANSYS 12

Setelah dilakukan pengukuran modul, diperoleh data temperatur sisi panas dan temperatur sisi dingin. Temperatur panas digunakan sebagai data *input* dalam proses simulasi. Data *input* yang lain adalah variabel kontrol arus listrik. *Input* arus listrik



terletak pada *copper* yang berada di bawah material tipe-n bagian ujung. Tegangan input di set nol V dan di letakkan pada *copper* yang menempel di bawah material tipe-p. Arah *heatflow* dari sisi dingin ke sisi panah yang mana sisi dingin berada pada sisi bagian atas. *Output* dari simulasi ini adalah distribusi temperatur dari temperatur terendah hingga tertinggi pada setiap bagian modul. Terdapat skala temperatur yang dapat diamati, sehingga nilai perbedaan temperatur yang diantara kedua sisi dapat dihitung.

*"Halaman Ini Sengaja di Kosongkan"*

## BAB IV

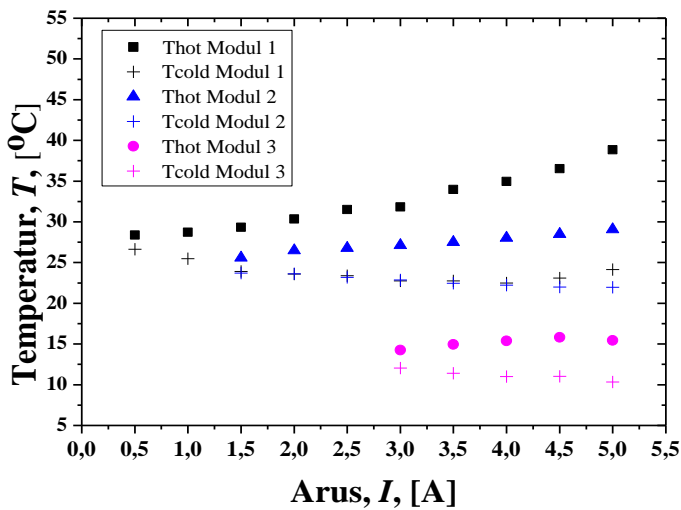
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, berisi hasil pengukuran perbedaan temperatur modul termoelektrik *cooler*, perhitungan resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *seebeck* modul, perhitungan tegangan kerja, daya yang dibutuhkan, dan koefisien performansi modul, serta simulasi modul termoelektrik *cooler*.

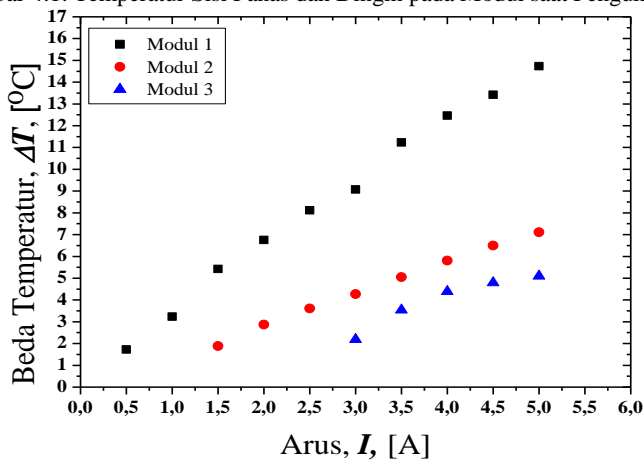
#### 4.1 Hasil Pengukuran Temperatur Modul Termoelektrik Cooler

Termoelektrik *cooler* bekerja berdasarkan prinsip efek *peltier*. Efek *peltier* merupakan sebuah efek yang terjadi ketika dua bahan semikonduktor berbeda disambungkan dan dialiri arus listrik maka akan terjadi perbedaan temperatur diantara kedua ujungnya. Modul termoelektrik *cooler* terdiri dari beberapa pasangan semikonduktor. Perbedaan temperatur diantara dua sisi dapat terjadi karena arus listrik masuk ke dalam bahan semikonduktor tipe-n, yang mana mayoritas pembawa muatannya adalah elektron. Ketika dialiri arus, elektron pada semikonduktor tipe-p mengalir menuju semikonduktor tipe-p. Karena tipe-p memiliki energi kurang dari tipe-n, maka elektron menyerap kalor dari lingkungan agar memperoleh cukup energi untuk mengalir. Oleh karena itu, sisi tempat elektron menyerap kalor terjadi temperatur dingin. Setelah elektron tiba pada tipe-n, energi kalor dialirkan menuju sisi yang lainnya. Lalu elektron mengalir dari semikonduktor tipe-n ke semikonduktor tipe-p. Karena mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, maka elektron melepas energi kalor ke lingkungan. Oleh karena itu pada sisi elektron melepas kalor terjadi temperatur panas. Temperatur pada sisi panas dan sisi dingin yang dihasilkan dari aliran arus pada

modul dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Temperatur Sisi Panas dan Dingin pada Modul saat Pengukuran



Gambar 4.2. Perbedaan Temperatur yang Dihasilkan Modul saat Pengukuran

Pada modul satu, telah terjadi efek *peltier* pada modul ketika modul dialiri arus 0,5A. Hal ini ditandai dengan terjadinya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin. Namun, untuk modul dua, efek *peltier* mulai terlihat ketika modul dialiri arus sebesar 1,5 Ampere. Pada modul tiga, efek *peltier* muncul saat modul dialiri arus sebesar tiga Ampere. Mulai terjadinya efek *peltier* menandakan bahwa suatu modul membutuhkan arus minimum untuk dapat bekerja. Ketika arus listrik masuk pada ujung tembaga modul satu, arus listrik memasuki material tipe-n menyebabkan elektron bergerak menuju arah datangnya arus, dan arus akan melewati material menuju konduktor logam dan bergerak dari atas sisi tipe-p menuju ke bawah membawa sejumlah kalor. Sedangkan pada modul dua, ketika arus masuk pada ujung tembaga modul dua, arus listrik dibagi menjadi dua bagian sama besar karena penyusunan material secara paralel dua. Oleh karena itu, arus yang melalui masing-masing material setengah dari arus *input*. Hal ini menyebabkan arus hanya mampu memberi energi yang sangat kecil kepada elektron untuk bergerak, sehingga tidak cukup untuk membangkitkan efek *peltier* pada modul. Efek *peltier* mulai terjadi ketika modul diberi arus yang lebih tinggi. Dalam percobaan ini, efek *peltier* baru terjadi pada modul dua ketika modul dialiri arus sebesar 1,5 Ampere. Pada modul tiga, arus listrik masuk pada ujung tembaga kemudian nilainya terbagi menjadi tiga, karena penyusunan material semikonduktor pada modul tiga secara paralel tiga. Hal ini menyebabkan efek *peltier* pada modul tiga baru terjadi pada nilai arus yang lebih besar dari saat efek *peltier* mulai muncul pada modul dua. Pada percobaan ini, efek *peltier* pada modul tiga mulai terlihat saat modul dialiri arus sebesar 3 Ampere. Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa nilai beda temperatur tertinggi terdapat pada modul satu dan terendah pada modul tiga. Artinya modul satu akan semakin cepat panas ketika dialiri arus secara terus-menerus,

sehingga modul akan lebih cepat rusak akibat temperaturnya yang terus naik.

Nilai temperatur terendah yang dihasilkan masing-masing modul berbeda-beda. Nilai temperatur terendah berturut-turut dihasilkan oleh modul tiga, modul dua, dan modul satu. Adapun nilai temperatur terendah yang dihasilkan modul tiga adalah  $15,99234^{\circ}\text{C} \pm 0,00001^{\circ}\text{C}$  pada arus input lima Ampere, pada modul dua adalah  $21,99714^{\circ}\text{C} \pm 0,00001^{\circ}\text{C}$  pada arus input 4,5 Ampere dan pada modul satu adalah  $22,50381^{\circ}\text{C} \pm 0,00001^{\circ}\text{C}$  pada arus input empat Ampere. Meski modul tiga memiliki beda temperatur terendah namun suhu dingin yang dihasilkan modul tiga paling rendah diantara ketiga modul. Artinya, modul tiga adalah modul yang paling baik digunakan sebagai modul termoelektrik *cooler*.

#### **4.2 Perhitungan Resistansi Listrik, Konduktansi Termal, dan Koefisien *Seebeck* tiap Modul**

Sebuah modul termoelektrik tersusun dari material-material yang memiliki sifat fisis atau karakteristik material yaitu resistivitas listrik, konduktivitas termal, dan koefisien *seebeck* material. Masing-masing material penyusun termoelektrik memiliki dimensi yang berbeda-beda. Dari sifat-sifat fisis dan dimensi material, dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *seebeck* total pada modul. Selanjutnya, data dari resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *seebeck* modul digunakan untuk menghitung tegangan listrik, daya yang dibutuhkan oleh modul dan koefisien performansi modul. Data sifat fisis material yang digunakan di tulis pada Tabel 4.4. Sifat-sifat material ini merupakan sifat material pada temperatur nol derajat hingga  $50^{\circ}\text{C}$ , karena temperatur hasil pengukuran pada penelitian ini berada dalam jangkauan tersebut.

Tabel 4.1. Sifat-sifat Material penyusun Termoelektrik

No	Material	Resistivitas Listrik (Ohm)	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Koefisien <i>Seebeck</i> (V/K)
1	Semikonduktor tipe-p	0,0067	0,9	$2,2 \times 10^{-4}$
2	Semikonduktor tipe-n	0,0077	0,98	$-1,8 \times 10^{-4}$
3	Tembaga	1,7E-08	400	-
4	Timah	2,2E-07	34,7	-
5	Alumina	-	40	-

#### 4.2.1 Resistansi Modul

Modul termoelektrik yang telah difabrikasi memiliki resistansi yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi penyusunan material semikonduktor yang berbeda. Berikut ini adalah hasil perhitungan resistansi dari ketiga modul.

##### a) Modul Satu

Copper, material semikonduktor tipe-p, tipe-n dan copper tersusun secara seri satu dengan yang lain. Sehingga resistansi total modul merupakan hasil penjumlahan dari resistansi masing-masing material yang digunakan.

Tabel 4.2 berikut ini adalah dimensi material yang digunakan dalam fabrikasi modul satu.

Tabel 4.2. Dimensi Material pada Modul Satu

No	Material	Dimensi (pxlxt) (mm)	Jumlah
1.	Material tipe-p dan tipe-n	2,5 x 2,5 x 1,5	18 tipe-p 18 tipe n
2.	Copper 1	3,75 x 2,5 x 0,3	2
3	Copper 2	6 x 2,5 x 0,3	5
4	Copper 3	5,5 x 2,5 x 0,3	30

Untuk menghitung resistansi modul, digunakan persamaan (2.8), sehingga resistansi modul satu dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$R = N(\rho_n + \rho_p) \frac{L}{A} + \rho_c \left( \frac{N_1}{A_1} + \frac{N_2}{A_2} + \frac{N_3}{A_3} \right)$$

$$R = 18(0,0067 + 0,0077) \frac{1,5 \times 10^{-3}}{2,5 \times 2,5 \times 10^{-6}} + 1,7 \times 10^{-8} \left( \frac{2}{3,75 \times 2,5 \times 10^{-6}} + \frac{5}{6 \times 2,5 \times 10^{-6}} + \frac{30}{5,5 \times 2,5 \times 10^{-6}} \right)$$

$$R = 0,667 \, \Omega$$

Setelah dilakukan perhitungan, nilai resistansi total pada modul satu adalah sebesar 0,667 Ohm

#### b) Modul Dua

Pada modul dua, dua material tipe-p dan dua material tipe n pada tersusun secara paralel. Dua material yang tersusun paralel dari masing-masing tipe-p dan tipe-n tersusun seri dengan *copper*. Tabel 4.3 berikut ini adalah dimensi material yang digunakan pada modul dua.

Tabel 4.3. Dimensi Material pada Modul Dua

No	Material	Dimensi (pxlxt) (mm)	Jumlah
1.	Material tipe-p dan tipe-n	2,5 x 2,5 x 1,5	18 tipe-p 18 tipe n
2.	Copper	3,75 x 6 x 0,3	2
3	Copper	13 x 2,5 x 0,3	2
4	Copper	5,5 x 6 x 0,3	15



Maka resistansi modul dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\frac{1}{R_{pp}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_p} = \frac{2}{R_p}$$

$$R_{pp} = \frac{R_p}{2}$$

$$\frac{1}{R_{pn}} = \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_n} = \frac{2}{R_n}$$

$$R_{pn} = \frac{R_n}{2}$$

$$R_{total} = N(R_{pp} + R_{pn}) + N_c R_c$$

$$R_{total} = 9 \left( \frac{R_p}{2} + \frac{R_n}{2} \right) + N_{c1} \frac{\rho_c}{A_{c1}} + N_{c2} \frac{\rho_c}{A_{c2}} + N_{c3} \frac{\rho_c}{A_{c3}}$$

$$R_{total} = 9 \left( \rho_p \frac{L}{2A} + \rho_n \frac{L}{2A} \right) + N_{c1} \frac{\rho_c}{A_{c1}} + N_{c2} \frac{\rho_c}{A_{c2}} + N_{c3} \frac{\rho_c}{A_{c3}}$$

$$R_{total} = \frac{9L}{2A} (\rho_p + \rho_n) + \rho_c \left( \frac{N_{c1}}{A_{c1}} + \frac{N_{c2}}{A_{c2}} + \frac{N_{c3}}{A_{c3}} \right)$$

$$R_{total} = \frac{9}{2} \frac{1,5 \times 10^{-3}}{2,5 \times 2,5 \times 10^{-6}} (0,0067 + 0,0077) + 1,7 \times$$

$$10^{-8} \left( \frac{2}{3,75 \times 6 \times 10^{-6}} + \frac{2}{13 \times 2,5 \times 10^{-6}} + \frac{15}{5,5 \times 6 \times 10^{-6}} \right).$$

$$R_{total} = 0,165 \, \Omega$$

Setelah dilakukan perhitungan, nilai resistansi total dari modul dua adalah 0,165 Ohm

### c) Modul Tiga

Pada modul tiga, tiga Material tipe-p dan tiga material tipe n pada modul tiga tersusun secara paralel, dan kedua jenis ini

tersusun seri satu sama lain dan dengan *copper*nya.

Berikut dimensi material yang digunakan dalam fabrikasi modul satu.

Dimensi material yang digunakan dalam fabrikasi modul 3 adalah seperti dituliskan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Dimensi Material pada Modul Tiga

No	Material	Dimensi (pxlxt) (mm)	Jumlah
1.	Material tipe-p dan tipe-n	2,5 x 2,5 x 1,5	18 tipe-p 18 tipe n
2.	Copper	20 x 2,5 x 0,3	2
3	Copper	9,5 x 3,75 x 0,3	2
4	Copper	5,5 x 9,5 x 0,3	10

Maka resistansi modul dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\frac{1}{R_{pp}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_p} = \frac{3}{R_p}$$

$$R_{pp} = \frac{R_p}{3}$$

$$\frac{1}{R_{pn}} = \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_n} = \frac{3}{R_n}$$

$$R_{pn} = \frac{R_n}{3}$$

$$R_{total} = N(R_{pp} + R_{pn}) + N_c R_c$$

$$R_{total} = 6 \left( \frac{R_p}{3} + \frac{R_n}{3} \right) + N_{c1} \frac{\rho_c}{A_{c1}} + N_{c2} \frac{\rho_c}{A_{c2}} + N_{c3} \frac{\rho_c}{A_{c3}}$$

$$R_{total} = 6 \left( \rho_p \frac{L}{3A} + \rho_n \frac{L}{3A} \right) + N_{c1} \frac{\rho_c}{A_{c1}} + N_{c2} \frac{\rho_c}{A_{c2}} + N_{c3} \frac{\rho_c}{A_{c3}}$$

$$R_{\text{total}} = 2 \frac{L}{A} (\rho_p + \rho_n) + \rho_c \left( \frac{N_{c1}}{A_{c1}} + \frac{N_{c2}}{A_{c2}} + \frac{N_{c3}}{A_{c3}} \right)$$

$$R_{\text{total}} = 2 \frac{1,5 \times 10^{-3}}{2,5 \times 2,5 \times 10^{-6}} (0,0067 + 0,0077) + 1,7 \times 10^{-8} \left( \frac{2}{20 \times 2,5 \times 10^{-6}} + \frac{2}{9,5 \times 3,75 \times 10^{-6}} + \frac{10}{9,5 \times 5,5 \times 10^{-6}} \right).$$

$$R_{\text{total}} = 0,07 \, \Omega$$

Setelah dilakukan perhitungan, nilai resistansi total modul tiga adalah 0,07 Ohm

#### 4.2.2) Konduktansi Modul

Konduktansi ketiga modul tersusun secara paralel. Hal ini karena kalor merambat dari sisi panas ke sisi dingin secara paralel pada semikonduktor, sehingga konduktansi ketiga modul bernilai sama. Untuk menghitung konduktansi total, digunakan persamaan berikut.

$$K = N(k_p + k_n) \frac{A}{L}$$

$$K = 18(0,9 + 0,98) \frac{2,5 \times 2,5 \times 10^{-6}}{1,5 \times 10^{-3}}$$

$$K = 0,141 \, \text{W/K}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, konduktansi termal ketiga modul adalah 0,141 W/K

#### 4.2.3) Koefisien *Seebeck*

Koefisien *seebeck* modul ditentukan oleh koefisien *seebeck* tipe-p dan tipe-n serta penyusunannya. Jumlah material tipe-p dan tipe-n pada ketiga modul adalah sama. Koefisien *seebeck* modul adalah sebagai berikut.

$$\alpha = N(|\alpha_p| + |\alpha_n|)$$

$$\alpha = 18(|2,2 \times 10^{-4}| + |1,8 \times 10^{-4}|)$$

$$\alpha = 0,072 \, \text{V/K}$$

Perbedaan penyusunan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n pada modul TEC menyebabkan modul memiliki resistansi yang berbeda-beda. Resistansi modul dari tertinggi hingga terendah berturut-turut adalah 0,667 Ohm; 0,165 Ohm; dan 0,07 Ohm. Setelah dilakukan perhitungan resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *seebeck* pada modul, selanjutnya hasil perhitungan tersebut digunakan untuk menghitung tegangan modul, daya yang dibutuhkan oleh modul, dan koefisien performansi modul.

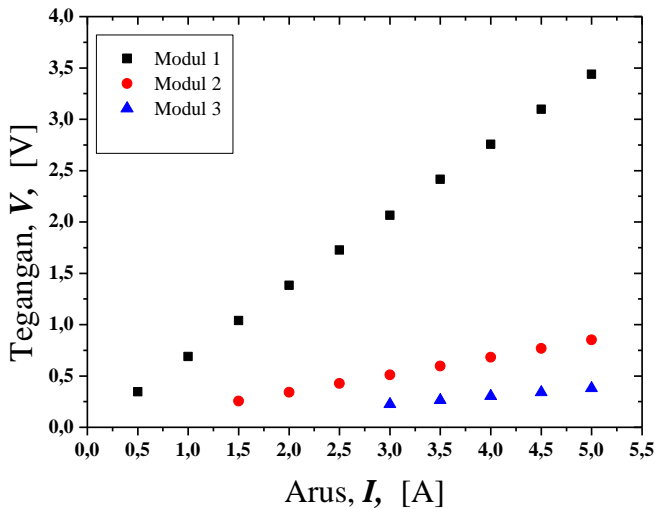
### **4.3 Perhitungan Tegangan Kerja, Daya yang Dibutuhkan, dan Koefisien Performansi Modul**

#### **4.3.1) Perhitungan Tegangan Modul**

Untuk menghitung tegangan pada modul, digunakan dengan persamaan berikut.

$$V = \alpha(T_h - T_c) + IR$$

Nilai tegangan yang bekerja pada modul baik ditulis dalam Gambar 4.1



Gambar 4.3. Pengaruh Arus terhadap Tegangan pada Modul

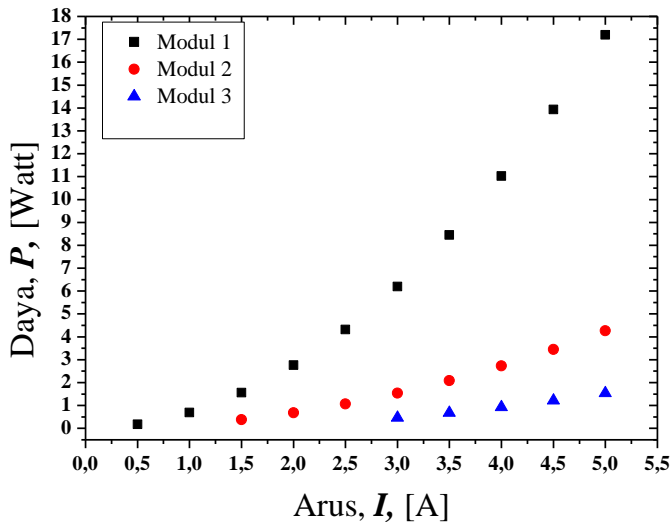
Pada Gambar 4.3, nilai tegangan pada modul terus meningkat secara linear untuk ketiga modul. Modul yang memiliki resistansi tertinggi hingga terendah berturut adalah modul satu, modul dua, dan modul tiga. Tegangan modul akan meningkat ketika arus input ditingkatkan. Hal ini sesuai dengan hukum Ohm dimana pada resistansi yang sama, arus dan tegangan berbanding lurus. Tegangan pada modul satu meningkat sangat signifikan dibanding modul dua dan modul tiga. Peningkatan tegangan ini dipengaruhi oleh beda temperatur yang dihasilkan modul dimana modul satu menghasilkan beda temperatur tertinggi dibanding dengan modul dua dan modul tiga.

#### 4.3.2) Perhitungan Daya yang Dibutuhkan Modul

Daya yang masuk pada modul dihitung dengan persamaan berikut.

$$P = \alpha I(T_h - T_c) + I^2 R$$

Daya yang dibutuhkan dari ketiga modul dapat dilihat pada grafik berikut ini.



Gambar 4.4. Pengaruh Arus terhadap Daya yang Bekerja pada Modul

Daya yang masuk pada modul merupakan selisih antara daya yang dikeluarkan oleh sisi panas dan daya yang diserap oleh sisi dingin modul. Dari gambar 4.4, terlihat bahwa daya yang bekerja berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir pada modul. Dari ketiga modul dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai kuadrat arus, maka daya yang bekerja juga akan semakin besar. Resistansi ketiga modul dari nilai tertinggi hingga terendah berturut-turut adalah modul satu sebesar 0,644 ohm; modul dua sebesar 0,161 ohm; dan modul tiga sebesar 0,071 ohm. Maka, pengaruh resistansi terhadap daya yang bekerja adalah berbanding lurus, semakin besar nilai resistansi modul, maka daya yang bekerja juga akan semakin besar pada setiap aliran arus yang sama.

#### 4.3.2) Perhitungan Koefisien Performansi Modul

Koefisien performansi (COP) suatu modul menyatakan kualitas

suatu modul. Koefisien performansi suatu modul merupakan ukuran perbandingan antara kalor yang diserap oleh sisi dingin dengan daya yang masuk pada modul. Daya yang masuk pada modul merupakan selisih antara kalor yang dibuang pada sisi panas tiap detiknya( $\dot{Q}_h$ ) dengan kalor yang diserap sisi dingin tiap detiknya( $\dot{Q}_c$ ). Secara umum, persamaan koefisien performansi modul dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h - \dot{Q}_c} = \frac{\dot{Q}_c}{P}$$

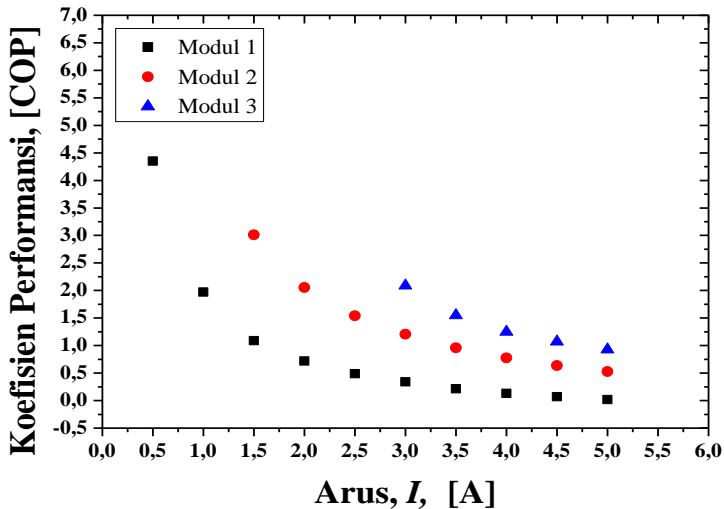
$$\dot{Q}_h = \alpha I T_h - K(T_h - T_c) + \frac{1}{2} R I^2$$

$$\dot{Q}_c = \alpha I T_c - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} R I^2$$

Suku pertama sebelah kanan pada persamaan untuk menghitung  $\dot{Q}_h$  dan  $\dot{Q}_c$  adalah kalor yang dilepas atau yang diserap karena pengaruh efek *seebeck*. Suku kedua adalah panas yang merambat secara konduksi dari permukaan panas menuju permukaan dingin atau disebut sebagai efek konduktivitas. Pada  $\dot{Q}_h$ , efek konduktifitas bernilai negatif karena panas mengalir dari permukaan panas ke permukaan dingin sedangkan  $\dot{Q}_h$  mengalir dari permukaan panas menuju lingkungan. Pada  $\dot{Q}_c$  efek konduktifitas bernilai negatif karena permukaan dingin menerima aliran panas akibat efek konduktifitas sedangkan  $\dot{Q}_c$  adalah panas yang diserap permukaan dingin. Suku ketiga adalah pemanasan Joule atau panas yang timbul akibat adanya aliran arus listrik. Pada  $\dot{Q}_h$ , pemanasan Joule bernilai positif karena baik  $\dot{Q}_h$  maupun pemanasan Joule keduanya mengeluarkan kalor. Sedangkan pada  $\dot{Q}_c$  bernilai negatif karena  $\dot{Q}_c$  menyerap kalor sedangkan pemanasan Joule melepas kalor. Adapun resistansi beban menjadi setengah dari resistansi awal karena diasumsikan beban dibagi menjadi dua, dimana setengah beban berpengaruh terhadap  $\dot{Q}_h$  dan setengah beban sisanya berpengaruh terhadap  $\dot{Q}_c$ .

Setelah dilakukan perhitungan, nilai koefisien performansi

pada modul dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Arus terhadap Koefisien Performansi Modul

Berdasarkan Gambar 4.5, koefisien performansi modul berbanding terbalik dengan arus yang mengalir pada modul. Semakin besar arus yang mengalir, maka koefisien performansi akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin besar arus yang mengalir, maka daya yang masuk pada modul juga akan semakin besar. Pengaruh arus terhadap koefisien performansi dapat dilihat pada ketiga modul. Pada penelitian ini, ketiga modul memiliki resistansi yang berbeda-beda dari nilai tertinggi hingga terendah berturut-turut adalah modul satu sebesar 0,644 ohm; modul dua sebesar 0,161 ohm; dan modul tiga sebesar 0,071 ohm. Jika dilihat pengaruh resistansi modul, semakin kecil resistansi suatu modul, maka koefisien performansi akan semakin besar pada aliran arus yang sama. Masing-masing modul termoelektrik memiliki koefisien performansi maksimal yang berbeda-beda. Pada modul satu, arus input sebesar 0,5 Ampere menghasilkan koefisien



performansi tertinggi. Setelah itu, turun secara drastis, hingga mencapai angka tertentu dan cenderung konstan. Pada modul dua, nilai koefisien performansi tertinggi dihasilkan modul saat dialiri arus sebesar 1,5 Ampere. Kemudian menurun dan cenderung konstan pada angka tertentu. Pada modul tiga, koefisien performansi tertinggi dihasilkan modul saat dialiri arus tiga Ampere kemudian turun dan cenderung konstan. Koefisien performansi tertinggi setiap modul diperoleh ketika arus *input* minimum yang dapat menyebabkan efek *peltier* pada modul. Meskipun COP tertinggi dihasilkan oleh modul satu, namun penurunan nilai COP modul satu paling rendah jika dibandingkan oleh modul dua dan modul tiga. Nilai COP cenderung konstan ketika dialiri arus dengan nilai yang semakin besar. Ketika arus yang mengalir semakin besar, nilai COP tertinggi dihasilkan oleh modul tiga. Dari gambar 4.3 juga dapat dilihat bahwa modul tiga memiliki nilai COP tertinggi untuk setiap arus *input* yang sama dan penurunan COP paling rendah ketika arus ditambah. Artinya, modul tiga memiliki nilai COP yang cenderung lebih konstan dibanding modul satu dan modul dua. Modul tiga memiliki koefisien performansi paling tinggi pada setiap arus *input* yang sama. Hal ini karena daya yang bekerja pada modul tiga adalah yang terkecil diantara ketiga modul. Hasil perhitungan nilai koefisien performansi pada sisi dingin modul yang memiliki temperatur terendah adalah pada modul satu, nilai koefisien performansi saat arus empat Ampere adalah  $0,12881 \pm 0,00001$ ; pada modul dua saat dialiri arus 4,5 Ampere adalah  $0,63361 \pm 0,00001$ ; dan pada modul tiga saat dialiri arus lima Ampere adalah  $0,92906 \pm 0,00001$ .

#### 4.4 Simulasi Modul Termoelektrik Cooler

Simulasi dengan software ANSYS digunakan untuk mengetahui temperatur dingin yang dapat dihasilkan modul ketika dialiri oleh arus listrik.

Variable input pada simulasi meliputi

a. Arus

Dalam percobaan ini arus yang digunakan adalah 0,5 A hingga 5 A dengan interval 0,5. Arus input dipasang pada tembaga yang berada di bawah material tipe N paling ujung

b. *Voltage*

*Voltage* di set nol dan dipasang pada tembaga yang berada di bawah material tipe p paling ujung

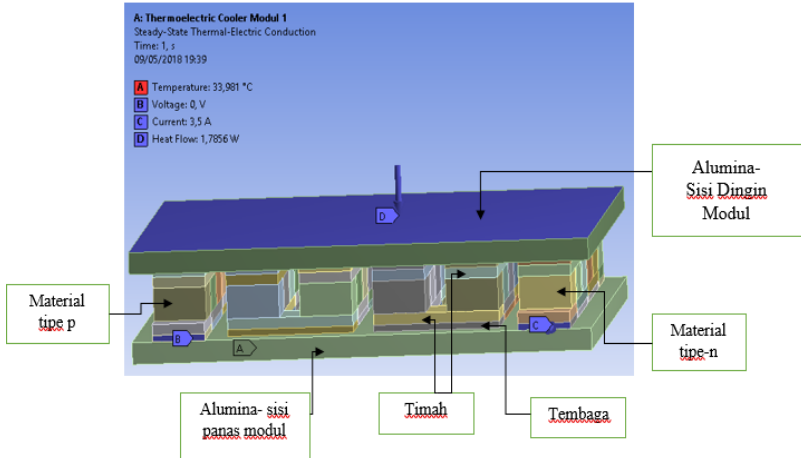
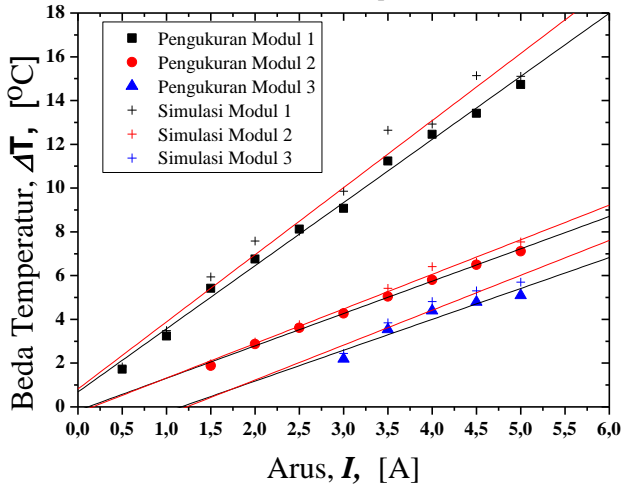
c. Temperatur panas

Temperatur panas di set pada modul sisi bawah, dengan asumsi sisi bawah merupakan sisi panas. Nilai dari temperatur panas yang di masukkan berasal dari nilai temperatur panas yang diukur termokopel saat percobaan

d. *Heatflow*

*Heatflow* adalah besarnya energi kalor yang mengalir dari sisi dingin modul ke sisi panas tiap detik. *Heatflow* diletakkan pada modul sisi atas dengan asumsi sisi atas modul merupakan sisi dingin. *Heatflow* dapat diartikan sebagai kalor yang diserap oleh sisi dingin pada modul. Pada sub bab 4.2, telah dilakukan perhitungan nilai *heatflow* pada masing-masing modul dan arus input. Nilai *heatflow* untuk masing-masing arus *input* dan modul selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

Gambar 4.6 merupakan letak variabel *input* pada material. Dalam gambar ini dicontohkan pada modul satu.

Gambar 4.6. Variabel *Input* pada Proses Simulasi

Gambar 4.7. Perbandingan Beda Temperatur Hasil Simulasi dan Pengukuran

Setelah dilakukan simulasi pada ketiga jenis modul, diperoleh nilai perbedaan temperatur untuk masing masing modul sebagai fungsi aliran arus. Gambar 4.7 adalah data nilai perbedaan

temperatur yang dihasilkan ketiga modul hasil simulasi dibandingkan dengan hasil pengukuran.

Linearitas dari masing-masing data grafik di atas ditunjukkan oleh Tabel 4.5

Tabel 4.5. Linearitas masing-masing data Hasil Simulasi dan Pengukuran.

Modul	Hasil	Linearitas	$R^2$
Modul 1	Pengukuran	$\Delta T(I) = 2,8839I + 0,68595$	0,99271
	Simulasi	$\Delta T(I) = 3,06679I + 0,81985$	0,9777
Modul 2	Pengukuran	$\Delta T(I) = 1,47819I - 0,16657$	0,99699
	Simulasi	$\Delta T(I) = 1,57996I - 0,26195$	0,98803
Modul 3	Pengukuran	$\Delta T(I) = 1,41126I - 2,9282$	0,88263
	Simulasi	$\Delta T(I) = 1,5946I - 1,9598$	0,90986

Perbandingan nilai data simulasi dan pengukuran menunjukkan bahwa, beda temperatur hasil simulasi lebih tinggi dari hasil pengukuran. Simulasi merupakan keadaan ideal suatu sistem yang mana tidak terdapat kesalahan teknis. Kesalahan kesalahan tersebut antara lain pemotongan material yang tidak presisi dengan ukuran yang telah ditemukan, penggunaan perekat, maupun penambahan timah yang tidak sesuai dengan ukuran pemodelannya.

Setelah dilakukan pengukuran dan simulasi, dihitung nilai error perbandingan beda temperatur antara hasil simulasi dan pengukuran. Perhitungan nilai error menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Error} = \left| \frac{\Delta T_{\text{simulasi}} - \Delta T_{\text{pengukuran}}}{\Delta T_{\text{simulasi}}} \right| \times 100\%$$

Nilai error masing-masing modul dapat dilihat pada Tabel 4.6, Tabel 4.7, Tabel 4.8 sebagai berikut.

Tabel 4.6. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Satu

No	Arus (A)	$\Delta T_{\text{simulasi}}$	$\Delta T_{\text{pengukuran}}$	Error (%)
1	0,5	1,83	1,72	5,87
2	1	3,49	3,23	7,24
3	1,5	5,94	5,42	8,75
4	2	7,58	6,76	10,87
5	2,5	8,03	8,12	1,14
6	3	9,86	9,08	7,92
7	3,5	12,64	11,23	11,14
8	4	12,92	12,46	3,59
9	4,5	15,14	13,42	11,38
10	5	15,11	14,73	2,51
Nilai error rata-rata				7,041

Tabel 4.7. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Dua

No	Arus (A)	$\Delta T_{\text{simulasi}}$	$\Delta T_{\text{pengukuran}}$	Error (%)
1	1,5	1,97	1,88	4,40
2	2	2,96	2,87	3,07
3	2,5	3,76	3,61	3,95
4	3	4,01	4,27	6,67
5	3,5	4,82	5,05	4,68
6	4	5,70	5,81	1,87
7	4,5	5,79	6,50	12,19
8	5	6,60	7,11	7,78
Nilai error rata-rata				5,577

Tabel 4.8. Error Hasil Simulasi dan Pengukuran Modul Tiga

No	Arus (A)	$\Delta T_{\text{simulasi}}$	$\Delta T_{\text{pengukuran}}$	Error (%)
3	3	1,90	2,19	15,12
3,5	3,5	3,84	3,54	7,76
4	4	4,82	4,39	8,84
4,5	4,5	5,30	4,79	9,64
5	5	5,70	5,09	10,57
Nilai error rata-rata				10,387

Setelah dilakukan perhitungan terhadap error perbandingan antara hasil simulasi dan pengukuran dari masing-masing modul, diketahui bahwa untuk modul satu, nilai error perbandingan yang diperoleh sebesar 7,041%, modul dua sebesar 5,577%, dan modul tiga sebesar 10,387%.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai temperatur terendah berturut-turut dihasilkan oleh modul tiga, modul dua, dan modul satu. Adapun nilai temperatur terendah yang dihasilkan modul tiga adalah  $15,99234^{\circ}\text{C} \pm 0,000005^{\circ}\text{C}$  pada aliran arus lima Ampere, pada modul dua adalah  $21,99714^{\circ}\text{C} \pm 0,000005^{\circ}\text{C}$  pada aliran arus 4,5 Ampere dan pada modul satu adalah  $22,50381^{\circ}\text{C} \pm 0,000005^{\circ}\text{C}$  pada aliran arus empat Ampere.
2. Nilai koefisien performansi modul satu pada arus empat Ampere adalah  $0,12881 \pm 0,000005$ ; pada modul dua saat dialiri arus 4,5 ampere adalah  $0,63361 \pm 0,000005$ ; dan pada modul tiga saat dialiri arus lima ampere adalah  $0,92906 \pm 0,000005$ .
3. Nilai error perbandingan beda temperatur antara hasil simulasi dan pengukuran untuk modul satu, modul dua, dan modul tiga berturut-turut adalah 7,04%; 5,58%; dan 10,39%.

#### 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh jumlah pasang material terhadap koefisien performansi yang dihasilkan.
2. Dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh kemampuan penyerapan panas pada *cooler*.

*“Halaman Ini Sengaja di Kosongkan”*



## DAFTAR PUSTAKA

- Aimable, N., 2017. Design, Modelling, and Fabrication of Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery in LLocal Process Industry. Universitetet I Agder.
- Cai, Y., Liu, D., Zhao, F.-Y., Tang, J.-F., 2016. Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices. *Energy Convers. Manag.* 124, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.011>
- Callister, William. 2009. *Material Science and Engineering an Introduction*. Versailles. USA
- Dimri, N., Tiwari, A., Tiwari, G.N., 2018. Effect of thermoelectric cooler (TEC) integrated at the base of opaque photovoltaic (PV) module to enhance an overall electrical efficiency. *Sol. Energy* 166, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.030>
- Febrianti, Nur. Hubungan Pemanasan Global dengan Temperatur Udara dan Curah Hujan di Indoensia. *Peneliti Bidang Aplikasi Klimatologi dan Lingkungan PUSFATSATKLIM, LAPAN Bandung*
- Fergus, J.W., 2012. Oxide materials for high temperature thermoelectric energy conversion. *J. Eur. Ceram. Soc.* 32, 525–540. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.10.007>
- Giancoli, D.T., 2005. *PHYSICS Principle with Application*, 6th ed. Pearson Education, Inc, New Jersey.
- Gokhale, P., Loganathan, B., Crowe, J., Date, Ashwin, Date, Abhijit, 2017. *Development of Flexible Thermoelectric Cells and Performance Investigation of Thermoelectric Materials for Power Generation*.

- Energy Procedia 110, 281–285.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.140>
- Huang, B.J., Chin, C.J., Duang, C.L., n.d. A design method of thermoelectric cooler.
- Li, S., Pei, J., Liu, D., Bao, L., Li, J.-F., Wu, H., Li, L., 2016. Fabrication and characterization of thermoelectric power generators with segmented legs synthesized by one-step spark plasma sintering. Energy 113, 35–43.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.034>
- Ma, M., Yu, J., 2014. An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications. Int. J. Refrig. 38, 352–357.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.08.017>
- Mani, P.I., 2016. Design, Modeling and Simulation of a Thermoelectric Cooling System (TEC). Western Michigan University, Kalamazoo, USA.
- Mitrani, D., Salazar, J., Turó, A., García, M.J., Chávez, J.A., 2009. One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE. Microelectron. J. 40, 1398–1405.  
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.04.001>
- Muntini, Melania S, Risse E, et al. 2017. *Comparison of Electrical Power for Thermoelectric Oxide Module*. Journal of Materials Science and Applied Energy 6(3) (2017) 238 - 242

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Fabrikasi Modul Termoelektrik *Cooler*



Gambar 1. Hasil Fabrikasi Modul Satu



Gambar 2. Hasil Fabrikasi Modul Dua



Gambar 3. Hasil Fabrikasi Modul Tiga

Lampiran 2. Hasil Perhitungan Tegangan yang bekerja pada modul  
Tabel 1. Hasil Perhitungan Tegangan yang Bekerja Pada Modul

Arus	Modul 1	Modul 2	Modul 3
0,5	0,346	-	-
1	0,690	-	-
1,5	1,039	0,255	-
2	1,382	0,341	-
2,5	1,725	0,426	-
3	2,065	0,511	0,226
3,5	2,414	0,597	0,266
4	2,756	0,682	0,304
4,5	3,097	0,768	0,342
5	3,440	0,852	0,380

Lampiran 3. Hasil Perhitungan Daya yang Bekerja pada Modul  
Tabel 3. Daya yang Bekerja Pada Modul Hasil Pengukuran

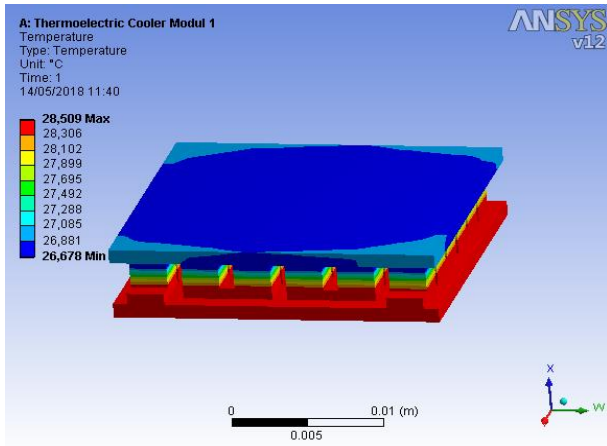
Arus	Modul 1	Modul 2	Modul 3
0,5	0,173	-	-
1	0,692	-	-
1,5	1,564	0,383	-
2	2,776	0,683	-
2,5	4,311	1,067	-
3	6,213	1,532	0,675
3,5	8,486	2,086	0,932
4	11,039	2,728	1,222
4,5	13,991	3,442	1,545
5	17,211	4,253	1,905

Lampiran 4. Hasil Perhitungan Koefisien Performansi Modul  
Tabel 3. Hasil Perhitungan Koefisien Performansi Modul

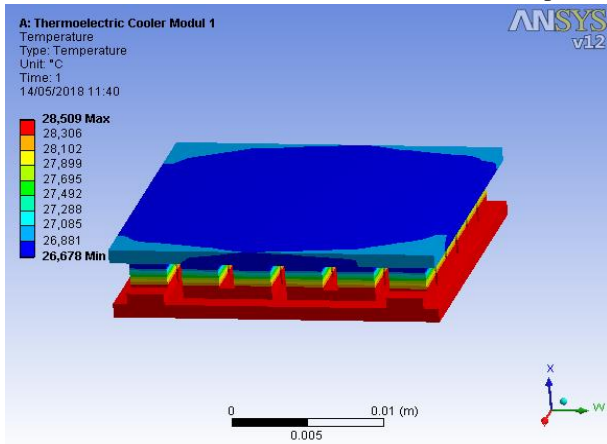
Arus	Modul 1	Modul 2	Modul 3
0,5	0,173	-	-
1	0,690	-	-
1,5	1,559	0,382	-
2	2,764	0,682	-
2,5	4,313	1,066	-
3	6,196	1,534	0,463
3,5	8,450	2,089	0,677
4	11,026	2,729	0,930
4,5	13,935	3,454	1,218
5	17,198	4,262	1,540

Lampiran 5. Hasil Simulasi Modul Termoelektrik Cooler

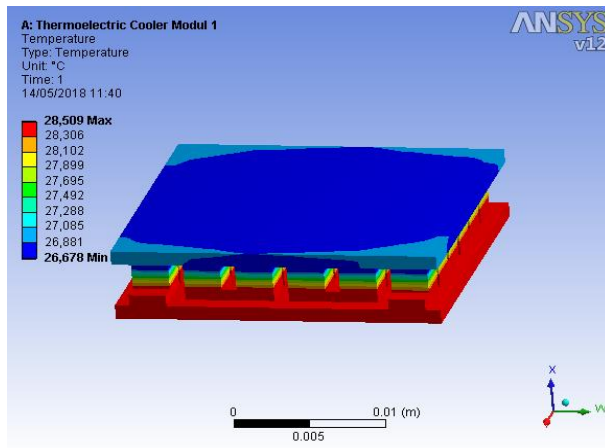
## a) Hasil Simulasi Modul 1



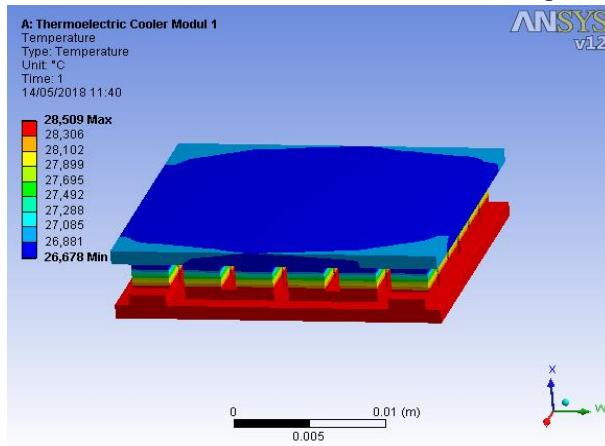
Gambar 1. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 0,5 Ampere



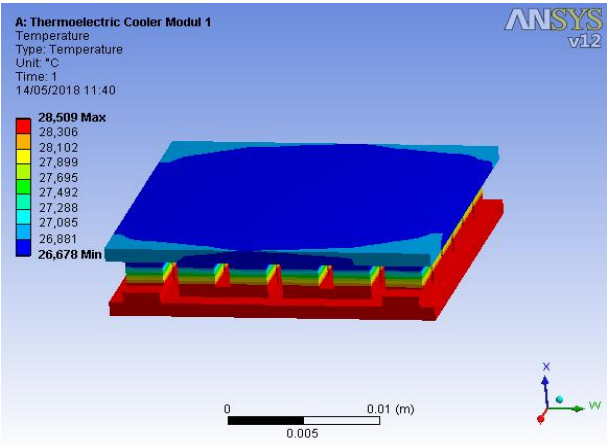
Gambar 2. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 1 Ampere



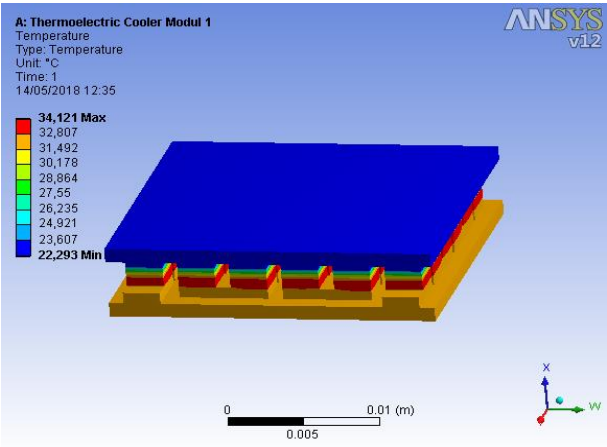
Gambar 3. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 1,5 Ampere



Gambar 4. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 2 Ampere

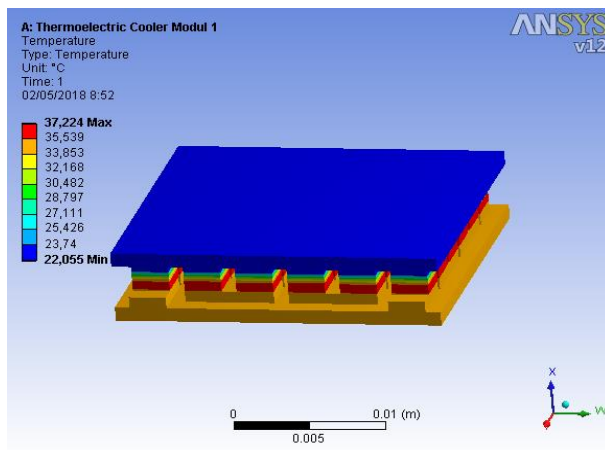


Gambar 5. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 2,5 Ampere

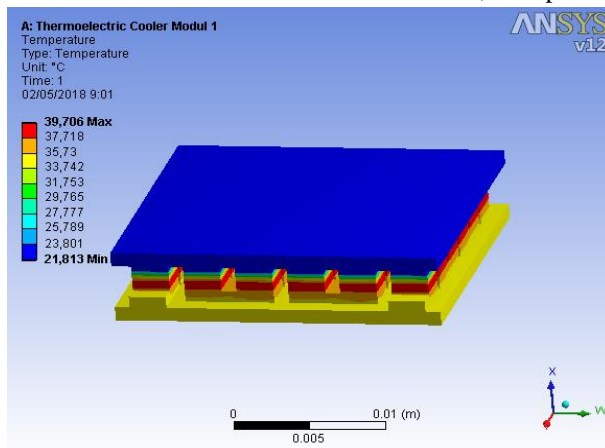


Gambar 6. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 3 Ampere

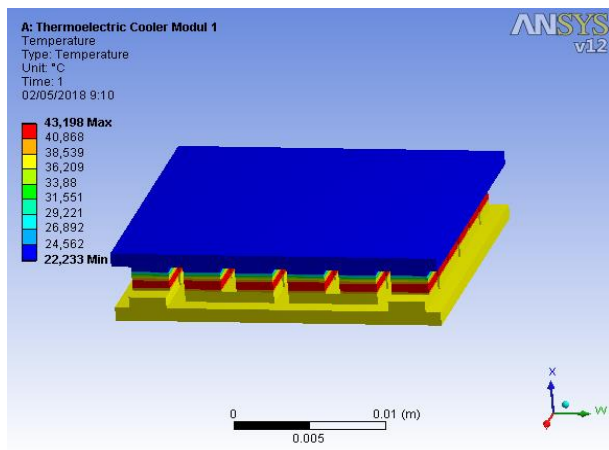




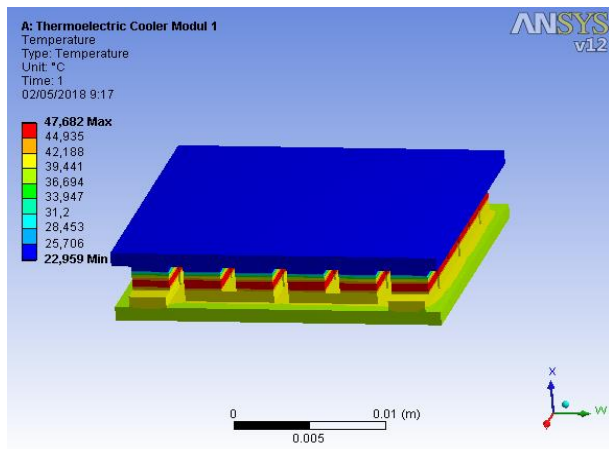
Gambar 7. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 3,5 Ampere



Gambar 8. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 4 Ampere

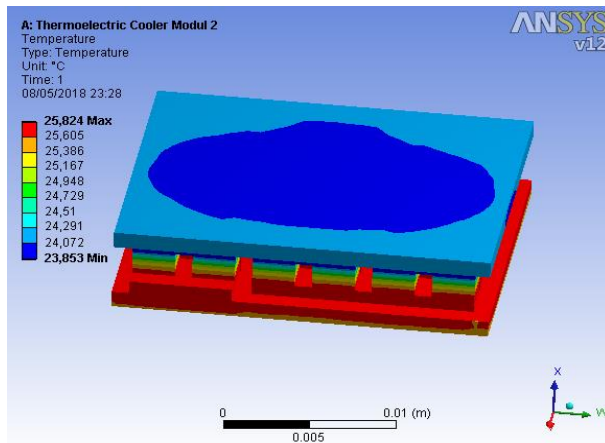


Gambar 9. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 4,5 Ampere

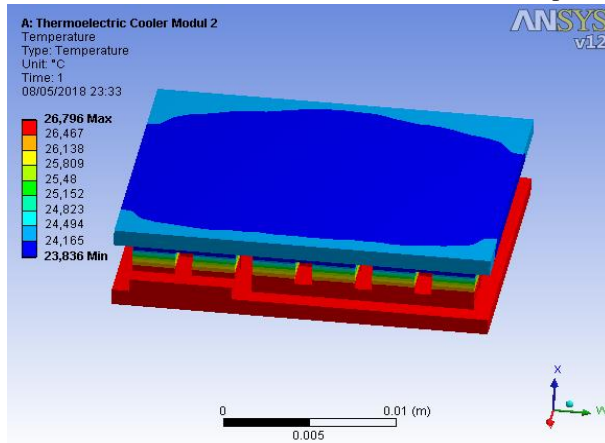


Gambar 10. Hasil Simulasi Modul 1 Arus 5 Ampere

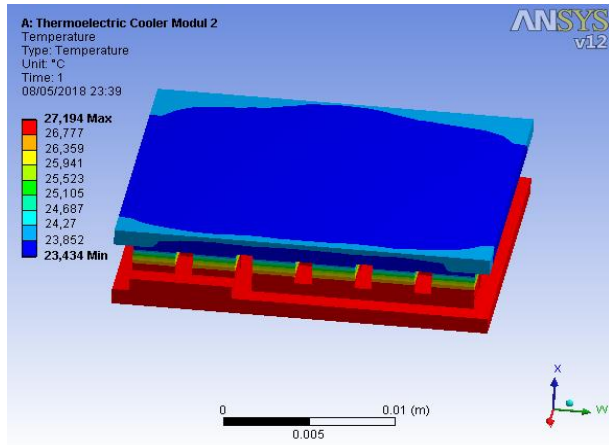
## b) Hasil Simulasi Modul 2



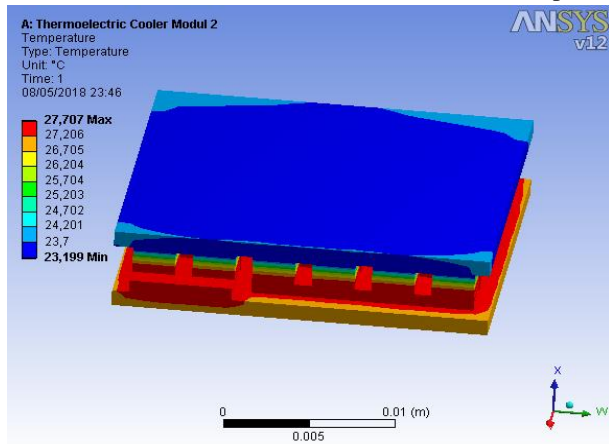
Gambar 11. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 1,5 Ampere



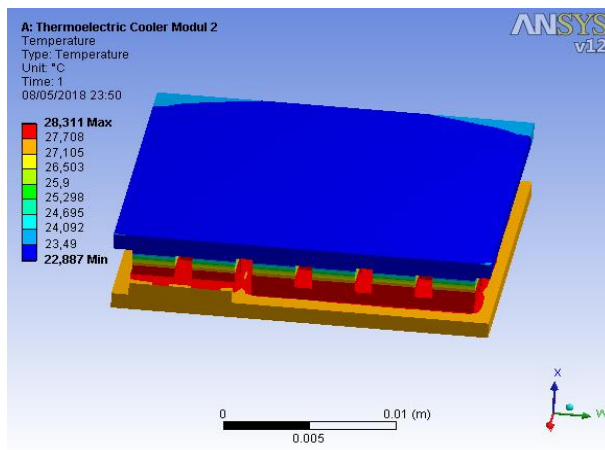
Gambar 12. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 2 Ampere



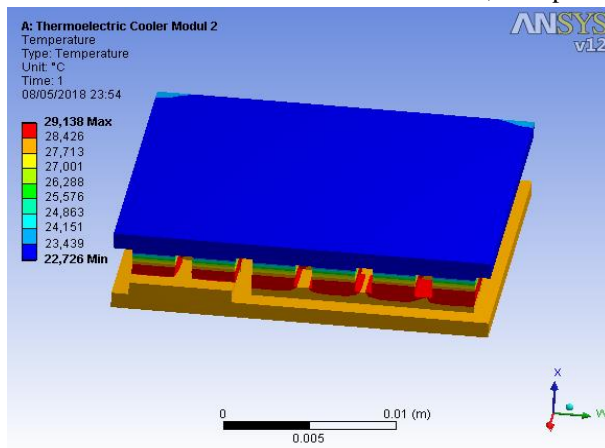
Gambar 13. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 2,5 Ampere



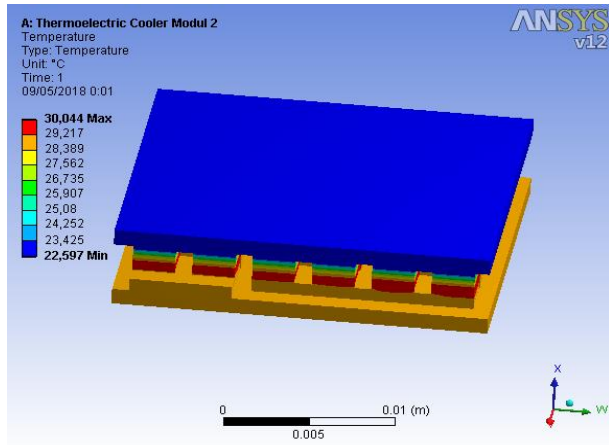
Gambar 14. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 3 Ampere



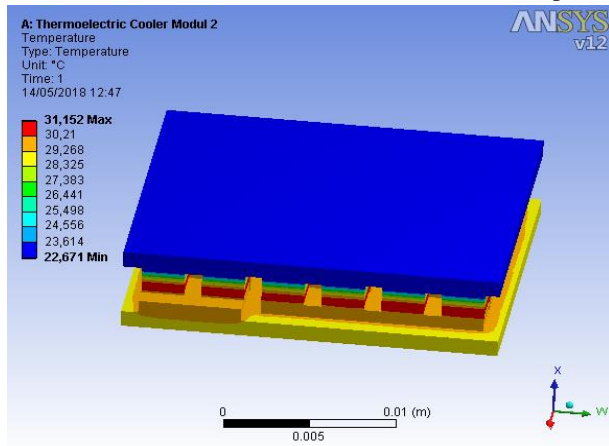
Gambar 15. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 3,5 Ampere



Gambar 16. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 4 Ampere

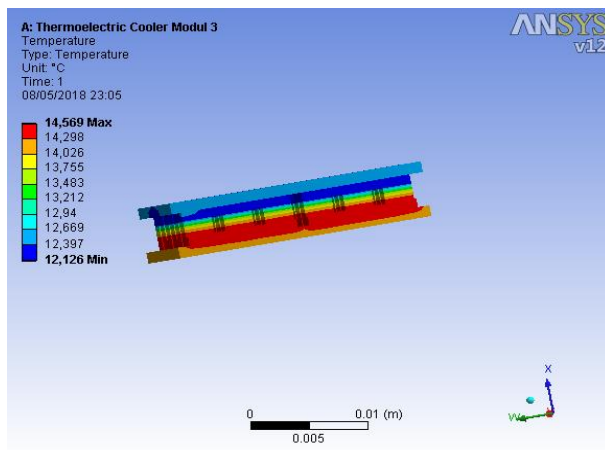


Gambar 17. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 4,5 Ampere

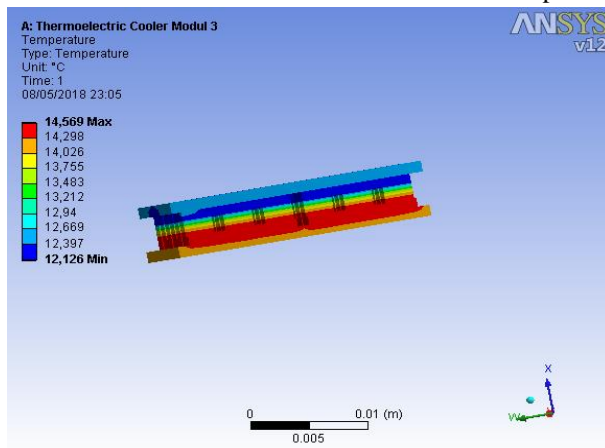


Gambar 18. Hasil Simulasi Modul 2 Arus 5 Ampere

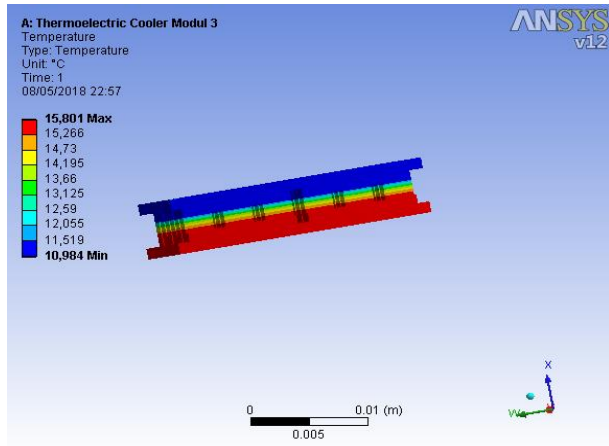
c) Hasil Simulasi Modul 3



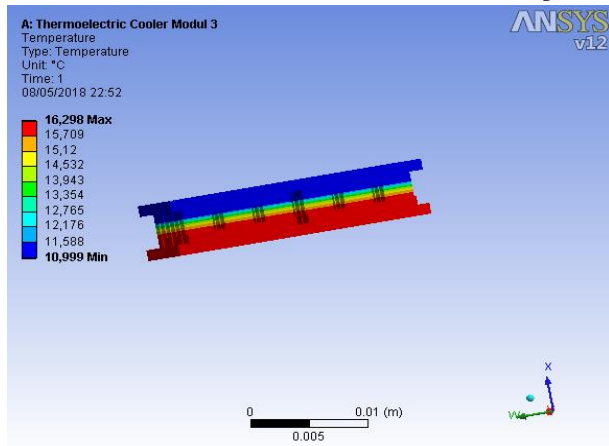
Gambar 19. Hasil Simulasi Modul 3 Arus 3 Ampere



Gambar 20. Hasil Simulasi Modul 3 Arus 3,5 Ampere

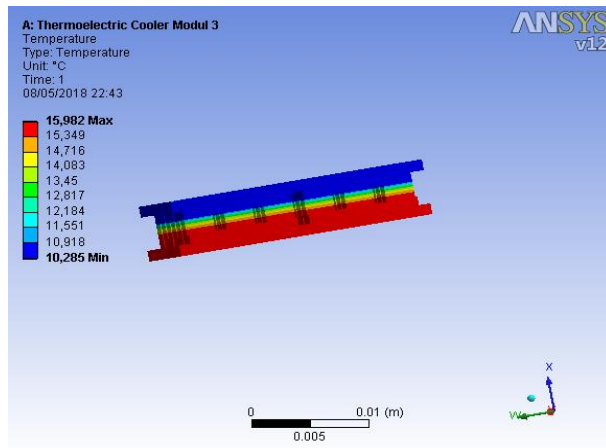


Gambar 21. Hasil Simulasi Modul 3 Arus 4 Ampere



Gambar 22. Hasil Simulasi Modul 3 Arus 4,5 Ampere





Gambar 23. Hasil Simulasi Modul 3 Arus 5 Ampere

## BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis yaitu Nilna Fauzia, dengan nama panggilan Nilna. Penulis dilahirkan di Blitar, 25 September 1995, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Ayah penulis bernama Khoirul Anam dan Ibu bernama Siti Rohana. Saat ini penulis tinggal di RT 02 RW 02 Kelurahan Tanggung Kecamatan Kepanjen Kidul Kabupaten Blitar. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Ponpes Mambaul Hisan, SDN 4 Sukawati, SMPN 1 Sukawati, dan SMAN Talun. Setelah lulus dari SMAN pada tahun 2014 penulis mengikuti SBMPTN-Tes Tulis dan diterima di Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Alam di ITS dan terdaftar dengan NRP 01111440000097. Di departemen Fisika ini penulis mengambil bidang studi instrumentasi dan elektronika. Penulis aktif Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) ITS. Penulis pernah menjadi asisten laboratorium Fisika Dasar 1, selain itu penulis menjadi asisten Dosen Fisika Dasar 2. Penulis untuk sekarang ini belajar software SolidWork secara otodidak. Saran dan kritik mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi email penulis.

[nilna.putrifauzia@gmail.com](mailto:nilna.putrifauzia@gmail.com)